

大気化学研究

Archives of Atmospheric Chemistry Research

第 55 号

日本大気化学会

Japan Society of Atmospheric Chemistry

目次

総説

Article No.

トピックス:「排出インベントリ」

人為起源 CO ₂ 排出インベントリと ODIAC	小田 知宏	055A01
日本の温室効果ガスインベントリ		
..... 畠中 エルザ, 小坂 尚史, 尾田 武文, 平田 絵里子, 伊藤 洋, 林 敦子, 秋元 さおり		055A02
アジア域を対象とした大気汚染物質及び短寿命気候強制因子(SLCFs)の排出インベントリ	黒川 純一	055A03

学会からのお知らせ

第 31 回大気化学討論会のお知らせ		
..... 森本 真司, 村田 功, 梅澤 拓, 菅原 敏, 町田 敏暢, 佐伯 田鶴,		
..... 石戸谷 重之, 亀崎 和輝, 後藤 大輔, 藤田 遼		055N01
2026 年度日本大気化学会奨励賞	日本大気化学会 運営委員会	055N02
第 4 回日本大気化学会論文賞の選考結果について.....	日本大気化学会 運営委員会	055N03
JpGU-AGU 2026 Atmospheric Chemistry セッション開催のお知らせ.....		
..... 江波 進一, 石野 咲子, 梅澤 拓, 山地 一代		055N04
日本大気化学会会員集会プログラム	日本大気化学会 運営委員会	055N05
第 43 回日本大気化学会運営委員会議事録	日本大気化学会 運営委員会	055N06

記事のご投稿について

論文や記事のご投稿をご検討されている方は、事前に本誌編集委員または日本大気化学会運営委員までご相談下さい。

大気化学研究編集委員：

池田恒平(編集長), 河野七瀬, 上田紗也子, 佐伯田鶴, 染谷有

日本大気化学会運営委員：

持田陸宏(名古屋大学), 齋藤尚子(千葉大学), 石野咲子(金沢大学),
池田恒平(国立環境研究所), 梅澤拓(東北大学), 江口菜穂(九州大学),
江波進一(筑波大学), 大島長(気象研究所), 大畑祥(名古屋大学),
河野七瀬(近畿大学), 関谷高志(海洋研究開発機構), 竹川暢之(東京都立大学),
中山智喜(長崎大学), 町田敏暢(国立環境研究所), 山地一代(神戸大学)

人為起源 CO₂排出インベントリと ODIAC

Anthropogenic CO₂ emission inventory and ODIAC

小田知宏^{1*}

人為起源 CO₂の高解像度グローバル排出データセット「Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂ (ODIAC)」は、夜間光衛星データや点源データベースを活用して国別排出統計を空間的に按分し、約 1 km 格子・月別の化石燃料起源 CO₂排出量マップを提供する。本稿では、ODIAC の開発を通して、排出インベントリの構築方法と不確実性、大気逆解析・衛星観測研究への応用、および今後の展望について述べる。

1. はじめに

産業革命以来、化石燃料の燃焼による二酸化炭素 (CO₂) の大気への排出は、大気 CO₂濃度上昇の主な原因であり、ひいては気候変動の最大の人為的要因にもなっている[IPCC, 2021]。炭素循環研究分野では、石炭・石油・天然ガスの燃焼、ガスフレア、およびセメント生産に起因する排出を合わせて化石燃料起源 CO₂排出量 (Fossil Fuel CO₂ emissions, FFCO₂) と総称する[e.g., Marland & Rotty, 1984; Andres et al., 2012]。国や地域、あるいは特定の排出源ごとの排出量を燃料種別・部門別などに系統的に整理したデータベースは「排出インベントリ (emission inventory)」と呼ばれ、大気汚染物質や温室効果ガスの排出量モニタリングに広く用いられてきた。気候変動分野では、国連気候変動枠組条約 (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) の下、締約国はそれぞれの排出インベントリを作成・報告する義務を負っており、近年は地方自治体や企業など、従来の国家報告の枠を超えた多様なアクターによる排出量開示も急速に広まっている[e.g., WRI & WBCSD, 2004]。こうした排出量情報を大気観測・大気モデルの入力値として活用する際には、空間的な広がりや細かな時間変動の情報が併せて必要となる。

格子化されたインベントリデータは、その代表例として読者にも馴染み深いであろう。本稿では、筆者が開発してきた FFCO₂インベントリデータ Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂ (ODIAC) を例に、開発の背景を交えながら方法論・不確実性・応用を概説し、今後の展望を述べる。本稿は、排出インベントリを大気モデルの入力値として日常的に利用している大気化学研究者にも、そうでない読者にも、インベントリデータがどのように構築され、どのような限界を持つかを知っていただく手がかりとなることを意図している。ODIAC は、CO₂の研究に携わっていない目にする機会も少ない、大気化学の世界ではマイナーなインベントリである。本稿では、そのニッチなデータセットの開発に携わってきた立場から、やや個人的な視点も交えて語ってみたい。

2. 人為起源 CO₂インベントリと時代背景

2.1 開発当初の時代背景

炭素循環研究において FFCO₂インベントリデータは、大気逆解析 (インバースモデリング) の先験情報 (prior) として特に重要な役割を果たしてきた。大気逆解析では、大気中 CO₂観測データと大気輸送モデルを組み合わせることで、地表面における正味の炭

素フラックスの空間分布を推定する[e.g., Tans *et al.*, 1990; Gurney *et al.*, 2002; Maksyutov *et al.*, 2013]。炭素循環研究の基本的な枠組みは、人間活動による排出量の約半分がそれ以下が陸域生態系・海洋に吸収されるという炭素収支の関係を利用するものである[e.g., Tans *et al.*, 1990; Gurney *et al.*, 2002; Maksyutov *et al.*, 2013; Byrne *et al.*, 2023]。CO₂の大気逆解析は、2000 年代半ばまでは主に、バックグラウンド大気をサンプルした観測データに基づく大陸スケールの解析が主流であった[e.g., Gurney *et al.*, 2002]。当時のグローバルな排出量インベントリデータは 1° × 1° 程度のグリッド解像度であったが[e.g., Andres *et al.*, 1996]、解析の解像度を考慮すれば十分であったと考えられる(のちに詳述)。この分野において、当時ゴールドスタンダードとして用いられていたのが、米国エネルギー省下の二酸化炭素情報解析センター (Carbon Dioxide Information Analysis Center, CDIAC) で開発されていたインベントリデータである[Andres *et al.*, 1996]。CDIAC はグローバルな炭素収支研究の初期からグローバルおよび国別の FFCO₂ の推定を行っており[e.g., Marland & Rotty, 1984]、炭素収支計算の重要な情報源として用いられてきた。CDIAC のインベントリデータは、国連機関が集める石炭・石油・天然ガス等の燃料消費データをもとに国別の FFCO₂ 排出量を推定し、その値を人口分布という空間情報の代理指標(プロキシ)を用いて分配する、シンプルかつ簡便なアプローチであった。

ここで、FFCO₂インベントリデータの重要性に関連して、炭素収支計算における重要な仮定を述べておきたい。FFCO₂はその性質上(化石燃料の燃焼に伴う CO₂排出)、統計データに大きな問題がないと仮定すれば、燃料消費などの統計から直接精度よく算出できる。燃料消費等のデータはその経済的重要性からモニタリングされており、輸出入に関する統計も存在するため、経済協力開発機構 (Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD) 加

盟国など先進国では特に高い精度で収集されていると考えられている(〜10%, 2σ)。このため、逆解析においては FFCO₂を既知量とみなし、不確実な自然起源フラックスを主な推定対象とする枠組みが標準的であり、この前提は現在も多くの逆解析研究で維持されている。裏を返せば、FFCO₂に起因する誤差はのちの解析に伝播するため、FFCO₂をモデル上で精度よく規定することは、逆解析で自然起源フラックスを精度よく推定するための必須条件である[e.g., Gurney *et al.*, 2002; Gurney *et al.*, 2004; Wang *et al.*, 2020; Oda *et al.*, 2023]。もっとも、現在からすると粗い CDIAC の解像度であっても、当時の逆解析の設定では大きな誤差要因とはならなかった。当時はまだ大陸・亜大陸スケールでの解析が主流であり、多くのバックグラウンド観測サイトは排出領域から遠く、近傍の影響を除くために観測データもフィルタリングされていた。このため、逆解析は、大規模スケールでの FFCO₂の総量を主な拘束条件とする一方、その空間分布の誤差に対しては感度が高くなかったといえる。さらに言えば、CDIAC は国別の値のみを用いており、国際航空やバンカー油のように定義上いずれの国の排出量にも含まれない排出は入っていなかった。すなわちグローバルな FFCO₂を完全にはカバーしていなかったが、それでも大きな課題とならなかったことは、当時の技術的な制約を示している。

2.2 温室効果ガス観測衛星時代の到来と ODIAC

2009 年以降、日本の「いぶき」Greenhouse gas Observing SATellite (GOSAT) や米・NASA の Orbiting Carbon Observatory 2 (OCO-2) に代表される温室効果ガス観測に特化した衛星が相次いで運用を開始し、FFCO₂インベントリデータに対する要請も変わってきた。これらの衛星は、これまで空白域とされてきた大気サンプルの観測がないエリアでもデータを取得し、炭素収支解析の精度と空間的情報を向上させることが期待された。また、都市スケールの CO₂シグナルを捉えることも可能となり、これまで推定

対象ではなかった人為起源排出そのものが研究対象となって、モニタリングの可能性へとつながった[Yokota *et al.*, 2009; Kort *et al.*, 2012; Eldering *et al.*, 2017; Wu *et al.*, 2020; Kiel *et al.*, 2021]。同時に、従来の逆解析の観点からも、衛星観測の高度化とともに大気輸送モデルの精度向上への要求が急速に高まり、高解像度排出インベントリデータの整備が喫緊の課題となった。これまでは大きなスケールでの総量が重要であり、空間的・時間的な変動は課題として顕在化していなかったが、観測がそれらに起因する誤差に感度をもつ水準で取得されるようになったのである。すなわち、FFCO₂インベントリデータは空間的・時間的パターンの精度を意識した開発が必要となり、逆解析がより高度かつ発展的な問題へと進むごとに、それらへ対応することとなった。

こうした時代背景・科学的要請を踏まえ、筆者らは 2009 年頃から国立環境研究所 (National Institute for Environmental Studies, NIES) において GOSAT プロジェクトの一環として ODIAC の開発を開始した[Oda & Maksyutov, 2011, 2015; Oda *et al.*, 2018]。ODIAC は、GOSAT を用いた逆解析およびそのプロダクト開発のために立ち上げられたものである。当時の GOSAT プロジェクトでは、高解像度の prior とオライーモデル・ラグランジュモデルを組み合わせた輸送計算によって、衛星観測データを高い空間分解能のまま解析できる体制を目指しており[e.g., Ganshin *et al.*, 2012; Janardanan *et al.*, 2016]、ODIAC の開発はその中核的な取り組みの一つであった。また、都市などにおける人為起源排出をターゲットとした研究が盛んになるにつれ、GOSAT などの衛星観測のターゲット選定においても精度の高いインベントリ情報が求められるようになり、高解像度インベントリ開発の重要性は今日に至るまで増し続けている。社会的なインパクトという点でも、パリ協定(2015 年)の採択以降、各国が約束した排出削減を科学的に検証することへの期待が高まり、排出量の「透明性(transparency)」の確保という観点からもインベントリの高精度化・標準化が

重要な課題となっている。各国のインベントリが自己申告に基づくことから、大気観測を活用した独立的な検証への期待も高まっており、モントリオール議定書における大気観測モニタリング[Montzka *et al.*, 2018]は一つの先例として参照されている。その中でインベントリデータは、大気観測データを利用するうえで欠かせないツールとなっている。さらに、国・地方自治体・企業といったスケールでの排出量把握への需要も増大しており、解像度という概念だけではなく、多様なスケールへの情報提供のツールとして、インベントリデータの守備範囲は広がり続けていると筆者は感じている。それに伴い、その難しさも増している。

3. ODIAC

FFCO₂インベントリデータとして国際的に広く利用されてきたデータセットには、先述の CDIAC, 欧州委員会 (European Commission)・共同研究センター (Joint Research Centre, JRC) による Emissions Database for Global Atmospheric Research (EDGAR) [Janssens-Maenhout *et al.*, 2019]), そして本稿で紹介する ODIAC がある。これらのデータセットはいずれも共通の統計資料(データ)を利用する部分があり、完全に独立した推計とは言えない側面もある[Andrew, 2020; NASEM, 2022]。例えば、Global Carbon Budget (GCB) が提供するインベントリデータは CDIAC をベースにしつつ、他のデータを用いた変更を加え、EDGAR の空間分布を用いてグリッド化している[e.g., Friedlingstein *et al.*, 2026]。元となる推計(グリッド化前)は各国エネルギー統計と排出係数に基づくボトムアップ推計であり、年次の国別総量を把握することを主眼とする。EDGAR は部門別・物質別の詳細な内訳を提供する点に特徴があり、政策評価や大気化学モデルの排出境界条件として広く用いられる(セクターアプローチ)。国別インベントリでもこの方法が主流である。一方 ODIAC では、既存のゴールドスタンダードであった CDIAC のデータを基準に、それよりも良いものを提供することを目指した。CDIAC は先述

のように燃料消費から出発する(リファレンスアプローチ)ため、セクターごとの数字は得られないものの、国の総量(消費された化石燃料がいずれ全て CO₂になる)という意味での強い制約をかけることができる。これは、地球という閉じた系の中での炭素収支計算の基本に立ち返れば非常に直接的であり、得られる排出量の数値としての有効性も高いと考えられる。実際、リファレンスアプローチから得られる数字はセクターアプローチの数字とよく一致するはずであり、FFCO₂のクロスチェックの方法としても有用である。なお、読者の中には CDIAC と ODIAC の名前が非常に似ていることも気がついた方もいるかもしれない。その件については、Oda and Maksyutov [2011]論文の査読の段階で査読者からもネーミングの正当性について疑問の声が上がった(査読コメント参照)。しかし、筆者が 2009 年にドイツ・イエナ(Jena)で行われた第 8 回二酸化炭素国際会議(8th International Carbon Dioxide Conference, ICDC8)以来親交を深めてきた Gregg Marland 氏をはじめとする当時 CDIAC チームからの強いサポートを頂き、ことなきをえて現在に至る。Marland 氏から頂いた「ODIAC という名称は、関連性も区別も明確である。そして、その知的なつながりには一種の面白みがある。」というコメントは、ODIAC、ひいては筆者の姿勢を端的に表現している。手前味噌ではあるが、このような歴史を歩んできた ODIAC であるが、炭素循環研究の世界の最近の若い世代は、FFCO₂研究のパイオニアである CDIAC を正しく認識しない方も多く、時代の変化を感じると共に、偉大なパイオニアの存在や ODIAC の面白さの部分が伝わらない葛藤も増えてきた。

若干内容が前後したが、インベントリデータの構築は「排出量の把握(国別統計の集計)」と「空間的按分(格子化)」の 2 段階から成る。ODIAC では、出発点となる国別化石燃料 CO₂排出量に CDIAC 由来の推計値(元データは CDIAC, 現在は GCB が改変した数値を EDGAR と組み合わせたもの)を使用している。初期のバージョンでは各国のエネルギー統計と

燃料種別の排出係数から算出していたが、現在では CDIAC の数字をそのまま用いており、ODIAC のグリッド版が公開されていない現在、実質的に ODIAC が CDIAC の値をそのままモデルに伝える役割を担っている。EDGAR をはじめとする通常のインベントリのセクターベースの構成とは異なり、リファレンスアプローチを採る ODIAC は、FFCO₂の特性上、セクターの粒度をもたない分、理論上は総量に対する制約をかけることが可能である。この意味で、あえてリファレンスアプローチにこだわって、炭素循環収支に特化したデータとすることには意味があり、この点を主張して筆者の所属先であり UNFCCC のオブザーバー機関でもある Universities Space Research Association (USRA) から第一回のグローバルストックテイク(GST)にも提出した。なお、一次統計の報告から利用可能になるまでには通常 1~2 年のラグが生じるため、最新年には予備的推計値を使用することになる。この遅延を短縮することは、ニアリアルタイム応用の観点から重要な課題の一つである(後述)。

国別総量として得られた排出量をより細かい空間スケールに分解するにあたり、ODIAC では大気から見たシグナルとして「点源か否か」で区分した。大気側の情報から見れば、排出は排出強度並びにプルームとして際立つ点源と、それ以外(線源や面源)に分けられる。したがって ODIAC の区分はセクターそのものではなく、あえて言えばセクターが統合されたものであり、この区分ごとに異なる空間代理変数を用いて格子化を行う。これは、逆解析をはじめとするデータとモデルの利用という側面に主眼を置いた結果である。発電・産業部門については大規模点源データベースを用いて個別の発電所・工場をマップ上に直接配置し、空間プロキシデータでは分解・表現しきれない大型点源を独立に扱う。それ以外の、地上交通部門や民生・商業部門に相当する部分(総量から点源を差し引いたもの)については、夜間光データを主要な按分因子として使用する。夜間光データは、古くから人間活動の強度やその位置・空間パターン

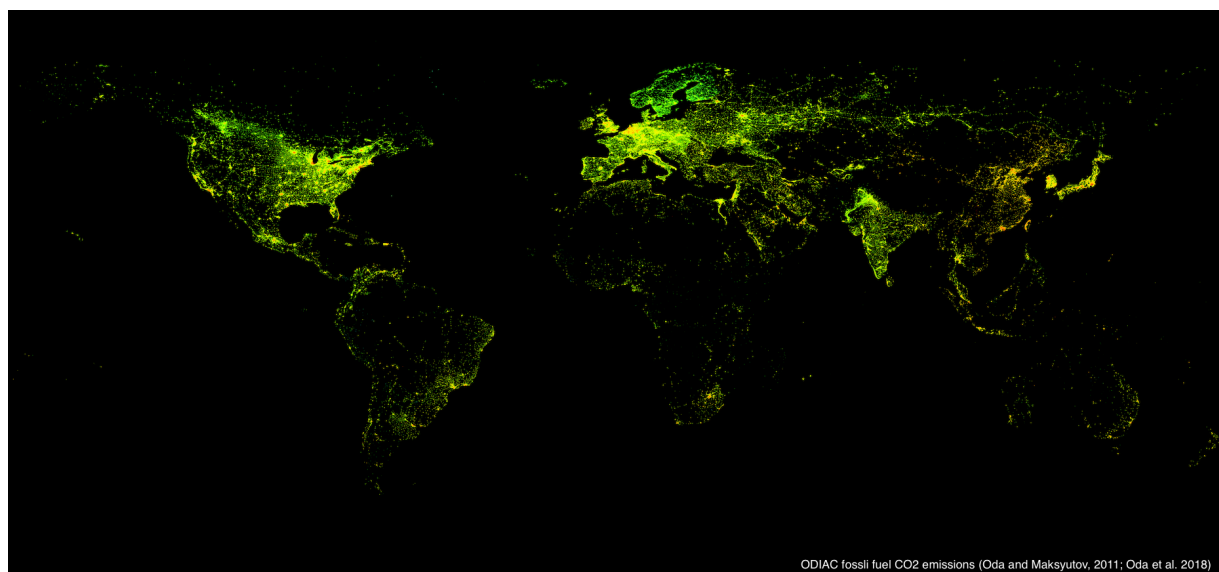


図 1 ODIAC によるグローバル化石燃料 CO₂排出分布図

を解析するデータとして使われてきた[e.g., Elvidge *et al.*, 1997]。夜間光データはアメリカ国防総省の極軌道気象衛星打ち上げ計画である防衛気象衛星計画 (Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) 衛星から得られたデータを元に作られた全球 30arc sec (1 km) プロダクトを用いた。特に ODIAC で用いられている夜間光データは、明るい都市部で測器のサチュレーションを起こさないように行われた特別観測から得られたものを使った。この ODIAC のアプローチは、セクターごとに道路ネットワークデータを組み合わせた按分を行う EDGAR などと比較するとインベントリとしては非常に粗いつくりであるが、観測データと大気モデルのミスマッチを最小限にすることを主眼としている点を再度強調したい。夜間光データには道路そのものは含まれないが、高解像度であるため主要幹線道路に沿った光などが捉えられており、それが大気モデルでの大気濃度再現性として現れている(後述)。こうした処理を経て、最終的に 30 秒角(約 1 km) 格子の CO₂ 排出フラクスマップが生成される(図 1)。なお、ODIAC は格子ごとの部門別内訳を提供するものではなく、総排出量の空間分布を高解像度で表現することを主眼としている。大気モデルへの入力という観点からは、部門の識別よりも排出量の空間

的・時間的な正確な表現が本質的に重要だからである。また、ベンチマークとした CDIAC には航空機や船舶の排出が含まれず国別の値のみであったため、ODIAC ではグローバルトータルが整合するようにも配慮した。

国別の値は年間値であるが、時間解像度については、燃料消費をもとに配分した月別の排出量を提供している[e.g., Andres *et al.*, 2011]。また、発電部門の気温依存の需要変動や交通部門の平日・休日パターンなど、部門ごとの月別プロファイル[Nassar *et al.*, 2013]を適用して時間按分を行うためのパラメータも提供している。ただしこうした月別プロファイルは国別・地域別の情報が限られており、発展途上国を中心に不確実性の大きな要素の一つとなっている点には注意が必要である[Oda *et al.*, 2023]。

4. 精度と不確実性

4.1 インベントリの精度と不確実性

精度の議論は容易ではない。格子単位での検証値は原則として存在せず、空間代理変数との相関がそのまま排出量の精度を保証するわけでもない[Andres *et al.*, 2014; Oda *et al.*, 2018, 2019, 2023]。インベントリ研究において空間・時間解像度を高めるこ

とは技術的に可能であり、特に FFCO_2 は統計からの算出が比較的確立された分野である。しかし、高解像度インベントリの精度がそのまま大気モデリングの改善に直結するかは自明ではなく、按分誤差の大きさは解析の設計(スケール・観測配置など)に依存し、大気への影響が限定的な場合もある。この評価の難しさはインベントリ研究の本質的な課題であり、方法論として合理的な手法であっても、客観的な検証なしにその精度を主張することはできない。排出量の空間分布や時間変動を高解像度で表現すること自体は技術的にますます容易になっている一方で、化学変化を起こさない FFCO_2 でさえ格子スケールでの定量的検証が困難であることを念頭に置けば、 NO_x など化学反応を伴う物質の排出量評価はさらに難しい。 CO_2 インベントリデータは、長寿命かつ高精度な衛星観測網が整備されつつあることから、他の排出物に対するベンチマークとして機能し得る点でも重要であると、筆者は密かに期待している。近年はより空間解像度の高い地理空間データ(geospatial data)が利用可能になっているが、そこには元となるデータポイントから、地理情報や衛星データを用いた解析、データの内挿・外挿が用いられている点には留意が必要である。例えば人口データなど、良い例である[e.g., Gaughan *et al.*, 2019]。元となるセンサスが毎年取得できるものかを考えれば、便利な地理空間データも所詮はモデルである。そう考えると、一見精緻に見えても、意味のある情報を備えておらず、正しい排出量を表現できていない可能性は否定できない。また、例えば人口分布を高解像度で表現できたとしても、一般的な排出量と人数との相関を超えて、細かい空間スケールでは一人当たりの排出量には地域差があり、そういった粒度の高い情報が十分に考慮できているのかも定かではない。

ODIAC では、そうしたデータやアプローチからく目に見える形の精緻さだけではなく、実際に大気輸送モデルと組み合わせて利用された際に、どれだけ観測された大気 CO_2 を再現できるかを客観的かつ定量

的なベンチマークとして開発に注力してきた。一見精緻な排出量データでも、大気濃度シミュレーションの再現性が高くないのであれば意味がないのではないかと、そこには埋められない究極的なアプローチの違いに起因するギャップがあるのではないかと、one size fits all などとは不可能で目的に応じたものがなければならないか、というのが筆者の立場である。これを筆者はインベントリにおけるルッキズムとして問題視している。ただ、かくいう筆者も ODIAC を夜の光のように美しい(だけではない)インベントリとして宣伝していることは、正直に告白・懺悔しておきたい。

4.2 国別排出量レベル

CDIAC や GCB によるグローバル合計の不確実性は、およそ $\pm 6 \sim 10\%$ (2σ)とされている[e.g., Marland, 2008; Andres *et al.*, 2014; Friedlingstein *et al.*, 2026]。国レベルの不確実性もこれに比例すると考えられ、OECD 諸国では 5% 程度 (1σ) と小さく、それ以外の国ではさらに大きいと言われている。これはエネルギー統計の精度・燃料熱量値・排出係数の各不確実性成分を組み合わせ推定したものである。ただし個別の国・地域ではその幅は大きく異なり、エネルギー統計が整備されている欧米・日本では相対的に小さい一方、一部の国(例えば中国)では石炭使用量の統計に課題があり、過去に推計値が大幅に修正された事例もある[Liu *et al.*, 2015]。こうした国別の不確実性は ODIAC の格子スケールの推計精度の上限を規定するものであり、インベントリ整備の国際協力を通じた燃料消費などのロバストなデータ収集など上流側の改善が重要である。なお、エネルギー統計については国ごとに輸出入の情報があるため、相互に監視され得る統計量となっている。このように、非常に高い精度で排出量は推定されているため、大きなエラーのソースは空間や時間の按分を行う際(モデリング)に引き起こされる。

4.3 空間按分レベル

より本質的な課題は、国別排出量を空間的に按分する過程に伴う不確実性である。夜間光データは排出量の空間分布の有力な代理変数ではあるが、万能ではない。これは高い空間スケールになる程顕著になる。例えば、フレアリング(ガス田の燃焼)は夜間光として強く検出されるため排出量を過大評価しやすく、別途補正が必要となる[Oda and Maksyutov, 2011]。逆に、農村部などの非電化地域の排出は夜間光にほとんど反映されず、反対にベトナムのドラゴンフルーツ栽培などから発生する夜間光は実際より排出を多く見積もってしまう可能性がある[Gaughan et al., 2019]。さらに、月別プロファイルの地域依存性や、部門別按分に用いる各種データの整備状況の差異も不確実性の重要な源泉である。これは夜間光プロキシに限った問題ではなく、度合いの違いはあれど、全てのプロキシを用いた空間按分に共通の問題である。このような方法論的背景から、異なるインベントリを用いた比較・アンサンブル評価がインベントリの評価において広く用いられる[e.g., Oda et al., 2015, 2018, 2019; Gaughan et al., 2019]。先述のように検証データがないので、インベントリ間の違いを不確実性の推定値(の代理)に使うアイデアである。しかし、時代が経ち、異なるインベントリデータが共通または同様のプロキシを利用し始めている現状では、仮にアンサンブルのスプレッドが縮小しても、それが不確実性が本質的に小さくなったことを示しているわけではない点に注意が必要である。使っているデータが似たり寄ったりになることが、多いだけである。また、先述のように人口分布にも夜間光などのデータが入っているので、いやでもそうなる。ただ、個々の排出源の特徴がより明確に見えてくる細かい空間スケールでの評価はとくに難しく、位置情報の精度だけでなく排出強度の仮定も結果に大きく影響する。

こうした空間按分されたインベントリデータの不確実性(可能であれば精度)を適切に評価するためには、インベントリデータが提供する排出量の情報を大気

輸送モデルと組み合わせたうえで、実際の大气への影響として定量的に評価することが不可欠である。米国を対象とした詳細な 1km×1km インベントリデータ Vulcan[Gurney et al., 2019, 2020]と Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) から得られる夜間光データで再分配した ODIAC (ODIAC-VIIRS [Oda et al., 2019; Oda et al., 2021b]) を衛星からのカラム CO₂ 濃度 (XCO₂) シミュレーションで比較した研究(図 2) では、空間分布の見かけ上の差異(空間モデリングなど方法の違い)にもかかわらず、大気での再現性の差は衛星の観測誤差の範囲に収まることが示されており、CO₂ の衛星観測モデルを用いた評価で求められる本質的な性能の差は小さいことを端的に示している。もちろん ODIAC を用いて都市の各排出セクターの影響評価などは不可能であるが、衛星 CO₂ データのみを用いた解析では、そもそも都市の総排出量をロバストに推定すること自体が非常に挑戦的な課題であり、高解像度インベントリが必ずしも整備されていない世界の都市でのアプリケーションで ODIAC が多用される理由はここにある。近年衛星データをふんだんに使った人口データなどの地理データがあるが、よりアップグレードされたデータを用いて按分したという方法論の定性的評価が、客観的な評価を経ることなく、そのまま精度の期待値に結びつけられるような評価に違和感を覚えている。

これは、時間分布についても言えることである。特定の排出に関連する活動のそれらしい時間的な代理指標を用いることで、例えば非常事態宣言のタイミングをうまく再現できるが(相関があるので当然である)、その情報を用いて排出量を精度よく推定すると、それは全く別の話である(図 3 [Le Quéré et al., 2020; Oda et al., 2021a])。注意として、筆者の研究を含む類似の研究は、そのアプローチから大きな不確実性を提示することになるが、先ほども述べたように国などの大きなシステムの区切りでは、精度よく求められているため、分配問題であり、その数字は大きいものの、その影響が大きいのか、それが大気のシグナ

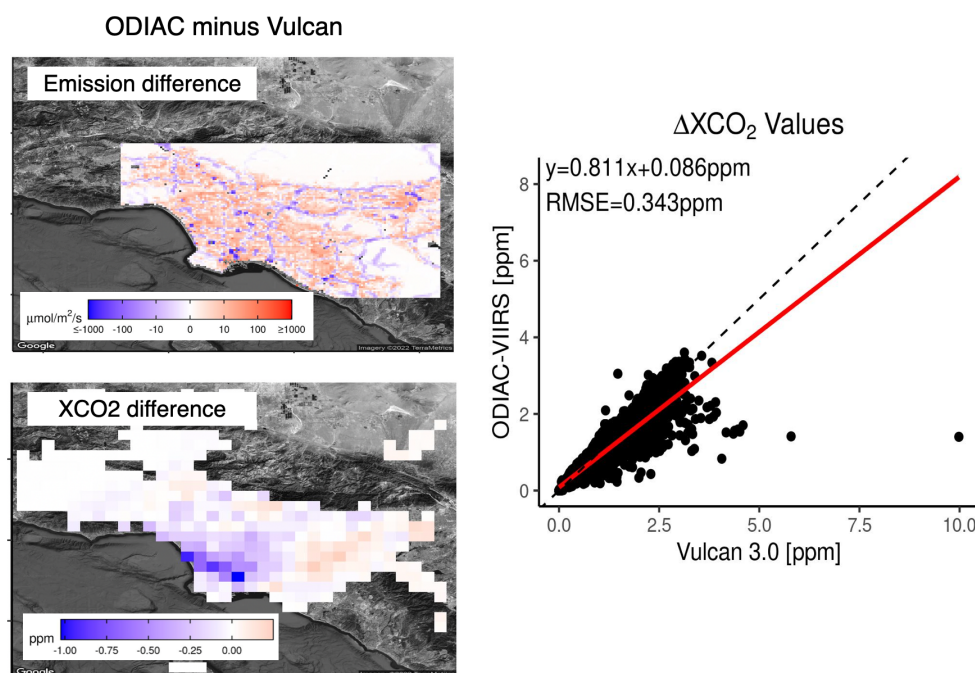


図 2 ロサンゼルス都市圏のカラム CO_2 濃度による排出分布比較 (Vulcan と ODIAC、カラム濃度のモデル計算は Dustin Roten・John Lin 両氏による)

ルとして解析に支配的な影響を与えるかという点とまた別の話である。

4.4 比較をベースにしたアプローチ

こうした困難を踏まえ、不本意ではあるが ODIAC ではアンサンブルアプローチ等を用いた不確実性の定量的評価に取り組んできた [Oda et al., 2015, 2019]。ODIAC の不確実性は、国別統計レベル、空間按分レベル、時間按分レベルという複数の階層に分けて考える必要があり、これらを網羅的に整理したのが Oda et al. [2019] である。同種の比較はさまざまな地域で実施してきた。そこでの問いは、ローカルに構築されたインベントリを基準として ODIAC がどれだけ異なるか、という点にある。実際には両者とも誤差を含むが、方法論やデータの面ではローカルなインベントリのほうが確からしいと考えたいため、そこからの差分はすべて ODIAC 側の誤差とみなすという、割り切った評価を行った。この方針のもと、ポーランド、米国、中国、日本などさまざまな地域について、ODIAC の

アプローチがどの程度うまく機能しているか、あるいはしていないかを調べてきた [Oda et al., 2019; Han et al., 2020; Saito et al., 2026]。

4.5 記述不足による不確実性

これらの比較を通して強く意識するようになったが、インベントリの不確実性を適切に伝えるためには、データ記述 (メタデータ) の充実が不可欠である。方法論が不透明であったり、再現に必要な情報が不足していたりするインベントリは、ユーザーが独自に精度を評価することができない。また、インベントリ比較を行っても、違いが出るのは方法論的に当たり前であり、なぜ違うのかという (少なくとも定性的な) 考察に必要なレベルの情報は論文に記述するべきである。ODIAC の記述においては、Oda et al. [2018] の Earth System Science Data (ESSD) 誌への投稿・査読過程での編集者 (当時) である David Carlson 氏とのやり取りで、筆者自身大変学ぶこととなった。論文ではデータ記述の標準化と透明性の向上し、またその Carlson

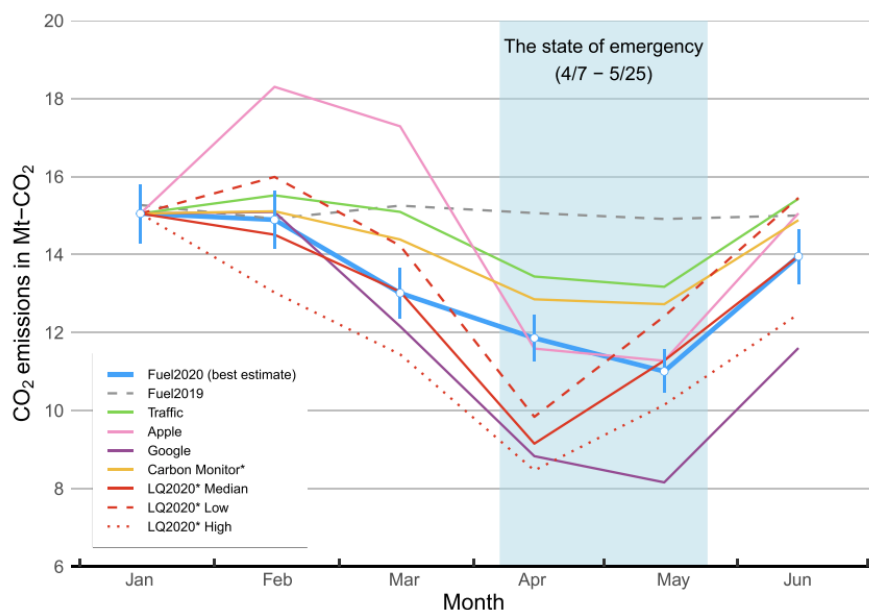


図 3 2020 年初旬の日本の非常事態宣言前後における交通からの CO₂排出量変動の推計の比較

氏との意見交換をまとめたものが、ESSD 誌の初のガイドラインとして出版された[Oda *et al.*, 2018; Carlson & Oda, 2018]。こうした学術出版プロセスを通じた品質保証の仕組みは、排出インベントリの信頼性確保において重要な役割を担っており、現在飛躍的に増加している AI の利用などに関連して、さらに重要性を増すと考えられる。

4.6 トップダウン検証と不確実性定量化

とはいえ、こうした相互比較だけでは決定的な情報は得られない。不確実性評価というのは、やや逃げの表現であり、可能であれば精度にアプローチしたいのである。そうすると、排出量は直接測れないので、やはり最終的な拠りどころは大気濃度である。インベントリの独立検証としては、大気観測と大気輸送モデルを組み合わせたトップダウン的な評価が重要である。パリ市街の CO₂フラックスを ODIAC と逆解析で比較した研究[Bréon *et al.*, 2015]や、OCO-2 による全球インバージョン[Crowell *et al.*, 2019]では、全体的な一致は良好なものの、特定の都市・地域では 20~40% 程度の系統的バイアスが見られる場合もある。また、Lauvaux *et al.*[2016] や Oda *et al.*[2017] で示された

ように、都市規模のインベントリが整備されていない地域においても、高解像度のインベントリデータがトップダウン解析の *prior* として有効に機能することが明らかになっている。こうしたトップダウン検証の知見を ODIAC にフィードバックし、按分パラメータを改善するサイクルが精度向上において不可欠である。ODIAC では現在、NASA Black Marble データ[Román *et al.*, 2018]を用いた感度解析による格子ごとの按分精度の向上(先述の ODIAC-VIIRS)、他のデータとのマージによる情報粒度の向上、および利用可能な不確実性推定情報の提供に向けた取り組みを進めており、ユーザーが可能な限り不確実性を定量的に考慮し、データが提供し得る情報の限界を理解したうえで解析を行えるようにすることを目指している。ただし、大気化学との関連で言えば、CO₂はその長寿命の性質ゆえに発生源の種別や部門レベルへの分解が CO₂ 大気観測のみでは困難であり、セクター・企業スケールでの排出量特定には依然として限界がある[NASEM, 2022]。なお、大気中 CO₂の大部分は完全燃焼に由来するとみなされているが、Wang *et al.*[2020] は、CO や CH₄、揮発性有機化合物(Volatile Organic Carbon, VOC)などの炭化水素が大

気中で酸化されて CO₂を生成するメカニズム(ケミカルポンプ)に起因する排出係数の空間差異が、逆解析の自然フラックス推定に与える影響を評価した。その結果、衛星観測では完全燃焼の仮定を置くことによる系統的バイアスが表面化しやすいことが示された。

5. 大気科学研究への応用・社会実装

名称に「Open-source」を冠しているように、ODIAC は論文に記した方法論に従えば再現・検証が可能であり、科学コミュニティが自由に利用・検証・改良できることを開発の基本方針としている。ODIAC データは、NIES のデータリポジトリから独立したデータセットとして毎年更新版が配布されているほか、GOSAT プロジェクトの地表面吸収排出量(Level 4, L4)プロダクトの一部としても提供されてきた。現在 ODIAC はバージョン 2025 (ODIAC2025)までリリースされており、筆者所属先の USRA を筆頭に、NIES, NASA, JAXA といった国際的な開発パートナーと継続的に更新を行っている。データセットは国立環境研究所・地球環境データベースから配布されている (<https://db.cger.nies.go.jp/dataset/ODIAC/>)。ODIAC は世界中の研究者に広く利用されており、その応用範囲は多岐にわたる。ODIAC の基盤を記述した 2 編の論文[Oda & Maksyutov, 2011; Oda et al., 2018]は合計 1,400 回以上引用されており、データセット自体も、Google Analytics に基づく集計では直近約 1 年間 (2025 年 6 月~2026 年 6 月)に ODIAC 関連ファイルのダウンロードが延べ約 1 万 7 千件、およそ 60 の国・地域に及んだ。とりわけ 1 km 解像度の GeoTIFF 版の利用が中心であり、高解像度インベントリへの需要の高さを示している。データ利用に関しては、細かい制約を設けず CC-BY 4.0 で配布したことも功を奏したと考えられる。

5.1 大気逆解析

最も広範な応用は、大気逆解析における prior としての利用である [e.g., Maksyutov et al., 2013;

Houweling et al., 2015; Crowell et al., 2019; Liu et al., 2021; Byrne et al., 2023]。NOAA の運用する CarbonTracker[Peters et al., 2007]や GEOS-Chem を用いた逆解析研究[Oda et al., 2023]では ODIAC が標準的な prior として採用されており、筆者が以前所属していた NASA ゴダード宇宙飛行センター (Goddard Space Flight Center)・全球モデリングデータ同化オフィス (Global Modeling and Assimilation Office, GMAO)で行われている OCO-2 濃度 (Level 3, L3)プロダクト[Weir et al., 2021]にも用いられるなど、全球・地域スケールの炭素フラックス推定の基盤データとなっている。逆解析の文脈では、prior 排出量の空間的な誤りが、推定される陸域炭素吸収量のバイアスに直結するため、ODIAC の精度が最終的な炭素収支推定の精度を大きく左右する。NIES が実施している GOSAT および GOSAT-2 データを用いた全球インバージョン解析でも ODIAC は prior として使用されており、国内の炭素収支研究と密接に結びついている。

5.2 衛星観測との組み合わせ

近年では、より局所的なスケールでの排出量情報の提供も可能になってきている。OCO-2/OCO-3 衛星による都市 CO₂プルームの観測研究では、プルームの期待シグナルの推定とモデル検証に ODIAC が広く使われている。個別の火力発電所からの CO₂排出量を衛星で定量化する研究[Nassar et al., 2017; Hakkarainen et al., 2021, 2023]では ODIAC のデータが参照値として機能しており、衛星観測と地上のインベントリからの排出情報を相互検証する研究分野の基盤を担っている。また、GOSAT の特定点観測や OCO-3 における特定点観測である Sampling Area Map (SAM) モード観測[Kiel et al., 2021], フランス・イギリスのミッションである MicroCarb の観測計画の策定[Wu et al., 2023]にも活用されてきた。こうした高解像度 GHG インベントリと衛星観測を組み合わせた研究の蓄積は、将来の排出削減モニタリング体制

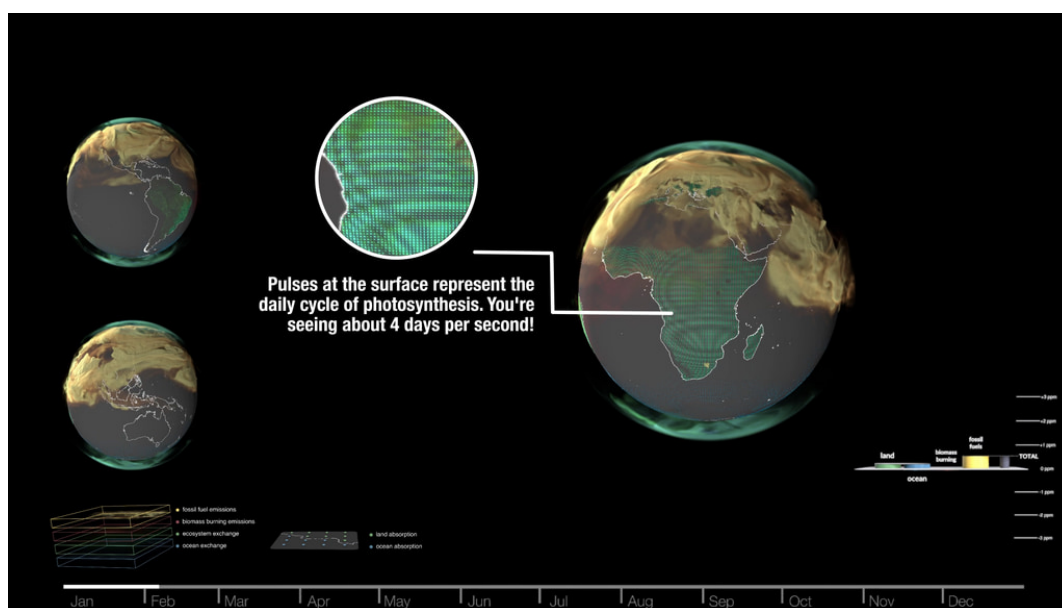


図 4 NASA SVS による ODIAC 高解像度排出可視化 (<https://svs.gsfc.nasa.gov/5110/>)

(Monitoring, Reporting and Verification; MRV) の科学的基盤を形成するものとして国際的にも注目されている。

5.3 グローバルストックテイクなどの社会への貢献

ODIAC は、OCO-2 ミッションおよび CEOS (地球観測衛星委員会) を通じた貢献に加え、UNFCCC のオブザーバーである USRA から直接、UNFCCC のグローバルストックテイク (Global Stocktake, GST) への貢献インプットとしても位置づけられている。CDIAC の系譜を引き継ぐ独立したベンチマークインベントリデータとして、エネルギー起源 CO_2 排出量の標準的な参照データの一つとなっている。また、ODIAC のデータは NASA の Scientific Visualization Studio (SVS) による高解像度 CO_2 排出可視化にも活用されており (図 4)、ソーシャルメディアなどでも多数ご利用いただいており、科学的成果を政策立案者や一般社会に伝えるアウトリーチの取り組みとしても注目されている [Oda et al., 2021b]。さらに、大気科学の枠を超えた政策・ガバナンス研究においても ODIAC の活用が広がっている。例えば、Hsu et al. [2022] は、欧州の都市 (2001~2018 年) の排出削減パフォーマンスを機械

学習で評価する研究において ODIAC を主要な空間排出データとして使用しており、都市の自己報告インベントリと ODIAC の固定発生源排出量との間に $r^2 = 0.81$ の高い相関が確認されたと報告している。こうした政策・ガバナンス研究への応用は、ODIAC の利用範囲が大気科学から社会実装へと広がっていることを示す好例である。方法論的にセクターがないなど、ODIAC のこういった研究への適用自体が疑問という指摘はもっともであるが、それに関わらず他のより正攻法のインベントリ手法に則ったインベントリよりも、より良く排出を捉えている (夜間光というシンプルなプロキシを使ったアプローチが、特定の目的のためにはうまくいっている) という結果はどう評価するべきか、まさに one size fits all はなく、多様な答えがあるという示唆であり、非常に面白いと筆者は感じている。

6. 今後の課題と展望

現在我々が ODIAC プロジェクトとして取り組んでいる課題は大きく 3 つある。

第一はニアリアルタイム推計の実現である。現状では最新の排出量推計に 1~2 年のデータラグがあり、現在進行形の観測データとの比較や政策評価への

即時応用において障壁となっている。各国の電力系統運用者が公開するリアルタイム発電データ、GCP の速報推計、さらには衛星 NO₂データと排出係数の組み合わせを活用することで、ラグを 3~6 ヶ月以内に短縮する取り組みを進めている。気候変動対策の進捗をリアルタイムでモニタリングするためのインフラとして、社会的な需要はますます高まるであろう。WMO の G3W (Global Greenhouse Gas Watch) に対しても、他とは独立した数字として貢献していく考えである。

第二は次世代 CO₂観測衛星との統合深化である。2025 年に打ち上げられた日本の GOSAT シリーズ3号機となる Global Observing SATellite for Greenhouse gases and Water cycle (GOSAT-GW), 近年打ち上げが期待される欧州の地球観測プログラム (Copernicus program) の Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring (CO2M) ミッションなど、高精度・高頻度の CO₂観測衛星が相次いで計画されている。これらの観測データから直接排出量の空間パターンを推定し、インベントリの按分パラメータを動的に更新する「衛星駆動型インベントリ (satellite-constrained inventory)」は、次世代の研究方向として注目されている。ボトムアップとトップダウンの情報を有機的に融合させることで、これまで困難だった部門別・都市別の排出量検証が可能になると期待される。こうした手法はパリ協定の MRV を支援する科学的ツールとしても重要な意味を持つ。NASEM の報告書 [NASEM, 2022] が指摘するように、観測とモデリングの高度化を通じた情報粒度の向上が社会的要請に応える鍵であり、CO₂インベントリで培った知見を NO_x など他の排出物・セクターへと展開していくことも、今後の重要な方向性の一つである。これだけニッチなインベントリでも語るべきことは多く、他の物質を含めればさらに興味深い議論ができるであろう。世界的な研究の流れや環境管理の歴史では、大気汚染のほう炭素循環より先行しているケースが多いが、また炭素循環の研究者として、UNFCCC のインベントリガイド

ラインでは GHG が先行し、SLCF (短寿命気候強制因子) が追っている形になっているのは、興味深い。

第三は、社会実装とオープンサイエンスとしての持続可能な運用体制の確立である。研究コミュニティの枠を超えた持続可能なデータインフラの構築が求められており、ODIAC はデータ・コードの公開を原則としているが、年次更新・品質管理・ユーザーサポートには相応のリソースが必要である。開発当初は限られたグループのみの利用であったが、オープンにデータが広く公開され、その利用も広がった。排出インベントリは、研究コミュニティと政策・実装の世界をつなぐインターフェイスとしての側面を持ち、その利用者層は今後ますます多様化することが予想される。地球大気化学国際共同研究計画 (International Global Atmospheric Chemistry, IGAC) 下のインベントリに特化した Global Emissions Initiative (GEIA) など、国際コミュニティとの連携を強化し、複数機関が協力・分担してインベントリ整備に貢献するガバナンス構造の構築が今後の大きな課題である。

終わりに、排出インベントリは、大気科学の定量解析と気候変動政策の双方をつなぐインターフェイスとして、その重要性はますます高まっている。ODIAC の開発を通じて実感することは、インベントリ研究が単なる「データ作り」ではなく、大気観測・大気輸送モデル・政策評価のすべてと密接に絡み合う、複合的な科学的営みであるということである。データ公開を原則とし、第三者が再現・検証できる設計思想、こうした透明性への姿勢こそが、インベントリ研究をサイエンスとして成り立たせる基盤であり、その科学的信頼性の根幹をなすものでもある。私自身、インベントリに関して全くの素人であったが、ODIAC の開発を通じ、排出インベントリという分野の奥深さと、科学的厳密さを問い続けることの重要性を実感した。十年前、インベントリ論文を学術誌に発表すること自体があまり容易ではなかった時代を経て、本分野はいまその重要度を急速に増している。研究コミュニティとして高い水準を維持しながら進めていくことが求められて

おり、オープンな設計思想を持つ ODIAC はそれを体現しようとしている。排出インベントリは「作って終わり」ではなく、観測コミュニティと双方向に連携しながら継続的に改善していくべきデータインフラである。日本の大気化学コミュニティをはじめとする幅広い研究者からの積極的な利用と、とくに批判的・建設的なフィードバックを今後も歓迎したい。

謝辞

これまでの ODIAC 開発は、GOSAT・NIES・NASA・JAXA をはじめ、多くの機関にご支援いただきました。国立環境研究所の Shamil Maksyutov 氏と当時の GOSAT モデルグループの皆さんには、ODIAC の立ち上げに多大な影響を与えていただきました。Gregg Marland 氏・Robert Andres 氏・T.J. Blasing 氏をはじめとする旧 CDIAC チームの皆様には、ODIAC 立ち上げ当初から非常に好意的にサポートして頂き、長年にわたりまたメンターとして多大な影響を受けてきました。高解像度シミュレーションを活用した都市スケールの解析など、ODIAC の応用の幅を飛躍的に広げてくださった Thomas Lauvaux 氏にも深く感謝申し上げます。国立環境研究所の環境データベースにて ODIAC を管理・提供いただいている塚田康弘氏・白井知子氏・山下陽介氏には、日頃から多大なご支援をいただいています。インベントリを深く考える機会を与えてくださった Rostyslav Bun 氏、ESSD 投稿の際に真摯な議論を重ね、データ公開ガイドラインの策定にまでつなげてくださった David Carlson 氏ほか多くの関係者に、心より感謝申し上げます。これまでのキャリアを通して日本語での主著での投稿経験がなく、また近年日本語を日常的に使うことも少なくなり、思った以上に日本語で執筆することに苦労しましたが、査読者の方には大変お世話になりました。また、今回の投稿を取りまとめたくださった、染谷有氏・佐伯田鶴氏に感謝いたします。

参考文献

- Andres, R.J. et al. (1996), A $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ distribution of carbon dioxide emissions from fossil fuel consumption and cement manufacture, 1950–1990, *Global Biogeochem. Cycles*, 10, 419–429.
- Andres, R.J., Gregg, J.S., Losey, L., Marland, G., & Boden, T. (2011), Monthly, global emissions of carbon dioxide from fossil fuel consumption, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 63(3), 309–327, doi: 10.1111/j.1600-0889.2011.00530.x.
- Andres, R.J. et al. (2012), A synthesis of carbon dioxide emissions from fossil-fuel combustion, *Biogeosciences*, 9, 1845–1871, doi: 10.5194/bg-9-1845-2012.
- Andres, R.J., Boden, T.A., & Higdon, D. (2014), A new evaluation of the uncertainty associated with CDIAC estimates of fossil fuel carbon dioxide emission, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 66, 23616, doi: 10.3402/tellusb.v66.23616.
- Andrew, R.M. (2020), A comparison of estimates of global carbon dioxide emissions from fossil carbon sources, *Earth Syst. Sci. Data*, 12, 1437–1465, doi: 10.5194/essd-12-1437-2020.
- Bréon, F.M. et al. (2015), An attempt at estimating Paris area CO₂ emissions from atmospheric concentration measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 1707–1724.
- Byrne, B. et al. (2023), National CO₂ budgets (2015–2020) inferred from atmospheric CO₂ observations in support of the global stocktake, *Earth Syst. Sci. Data*, 15, 963–1004, doi: 10.5194/essd-15-963-2023.
- Carlson, D., & Oda, T. (2018), Editorial: Data publication – ESSD goals, practices and recommendations, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2275–2281, doi: 10.5194/essd-10-2275-2018.
- Crowell, S. et al. (2019), The 2015–2016 carbon cycle as seen from OCO-2 and the global in situ network, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 9797–9831.
- Eldering, A. et al. (2017), The Orbiting Carbon Observatory-2 early science investigations of regional carbon dioxide

- fluxes, *Science*, 358, eaam5745, doi: 10.1126/science.aam5745.
- Elvidge, C.D. et al. (1997), Mapping city lights with nighttime data from the DMSP operational linescan system, *Photogramm. Eng. Rem. S.*, 63, 727–734.
- Friedlingstein, P. et al. (2026), Global Carbon Budget 2025, *Earth Syst. Sci. Data*, 18, 3211–3288, doi: 10.5194/essd-18-3211-2026.
- Ganshin, A. et al. (2012), A global coupled Eulerian-Lagrangian model and 1×1 km CO₂ surface flux dataset for high-resolution atmospheric CO₂ transport simulations, *Geosci. Model Dev.*, 5, 231–243.
- Gaughan, A.E. et al. (2019), Evaluating nighttime lights and population distribution as proxies for mapping anthropogenic CO₂ emission in Vietnam, Cambodia and Laos, *Environ. Res. Commun.*, 1, 091006, doi: 10.1088/2515-7620/ab3d91.
- Gurney, K.R. et al. (2002), Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models, *Nature*, 415, 626–630.
- Gurney, K.R. et al. (2004), TransCom 3 inversion intercomparison: Model mean results for the estimation of seasonal carbon sources and sinks, *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1010, doi: 10.1029/2003GB002111.
- Gurney, K.R. et al. (2019), Comparison of global downscaled versus bottom-up fossil fuel CO₂ emissions at the urban scale in four US urban areas, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 124, 2823–2840, doi: 10.1029/2018JD028859.
- Gurney, K.R. et al. (2020), The Vulcan Version 3.0 High-Resolution Fossil Fuel CO₂ Emissions for the United States, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2020JD032974, doi: 10.1029/2020JD032974.
- Han, P. et al. (2020), Evaluating China's fossil-fuel CO₂ emissions from a comprehensive dataset of nine inventories, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 11371–11385, doi: 10.5194/acp-20-11371-2020.
- Hakkarainen, J. et al. (2021), Analyzing nitrogen oxides to carbon dioxide emission ratios from space: A case study of Matimba Power Station in South Africa, *Atmos. Environ. X*, 10, 100110, doi: 10.1016/j.aeaoa.2021.100110.
- Hakkarainen, J. et al. (2023), Building a bridge: characterizing major anthropogenic point sources in the South African Highveld region using OCO-3 carbon dioxide snapshot area maps and Sentinel-5P/TROPOMI nitrogen dioxide columns, *Environ. Res. Lett.*, 18, 035003, doi: 10.1088/1748-9326/acb837.
- Houweling, S. et al. (2015), An intercomparison of inverse models for estimating sources and sinks of CO₂ using GOSAT measurements, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 5253–5266, doi: 10.1002/2014JD022962.
- Hsu, A., Wang, X., Tan, J., Toh, W., & Goyal, N. (2022), Predicting European cities' climate mitigation performance using machine learning, *Nat. Commun.*, 13, 7487, doi: 10.1038/s41467-022-35108-5.
- IPCC (2021), Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V. et al. (eds.)], *Cambridge University Press*, Cambridge, UK and New York, NY, USA, doi: 10.1017/9781009157896.
- Janardanan, R. et al. (2016), Comparing GOSAT observations of localized CO₂ enhancements by large emitters with inventory-based estimates, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3486–3493, doi: 10.1002/2016GL067843.
- Janssens-Maenhout, G. et al. (2019), EDGAR v4.3.2 Global Atlas of the three major greenhouse gas emissions for the period 1970–2012, *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 959–1002, doi: 10.5194/essd-11-959-2019.
- Kiel, M. et al. (2021), Urban-focused satellite CO₂ observations from the Orbiting Carbon Observatory-3: A first look at the Los Angeles megacity, *Remote Sens. Environ.*, 258, 112314, doi: 10.1016/j.rse.2021.112314.
- Kort, E.A., Frankenberg, C., Miller, C.E., & Oda, T. (2012), Space-based observations of megacity carbon dioxide,

- Geophys. Res. Lett.*, 39, L17806, doi: 10.1029/2012GL052738.
- Lauvaux, T. et al. (2016), High-resolution atmospheric inversion of urban CO₂ emissions during the dormant season of the Indianapolis Flux Experiment (INFLUX), *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 5213–5236, doi: 10.1002/2015JD024473.
- Le Quéré, C. et al. (2020), Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement, *Nat. Clim. Change*, 10, 647–653.
- Liu, J. et al. (2021), Carbon Monitoring System Flux Net Biosphere Exchange 2020 (CMS-Flux NBE 2020), *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 299–330, doi: 10.5194/essd-13-299-2021.
- Liu, Z. et al. (2015), Reduced carbon emission estimates from fossil fuel combustion and cement production in China, *Nature*, 524, 335–338.
- Maksyutov, S. et al. (2013), Regional CO₂ flux estimates for 2009–2010 based on GOSAT and ground-based CO₂ observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 9351–9373.
- Marland, G., & Rotty, R.M. (1984), Carbon dioxide emissions from fossil fuels: a procedure for estimation and results for 1950–1982, *Tellus B*, 36, 232–261, doi: 10.1111/j.1600-0889.1984.tb00245.x.
- Marland, G. (2008), Uncertainties in accounting for CO₂ from fossil fuels, *Journal of Industrial Ecology*, 12(2), 136–139, doi: 10.1111/j.1530-9290.2008.00014.x.
- Montzka, S.A. et al. (2018), An unexpected and persistent increase in global emissions of ozone-depleting CFC-11, *Nature*, 557, 413–417, doi: 10.1038/s41586-018-0106-2.
- Nassar, R. et al. (2013), Improving the temporal and spatial distribution of CO₂ emissions from global fossil fuel emission data sets, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 917–933, doi: 10.1029/2012JD018196.
- Nassar, R. et al. (2017), Quantifying CO₂ emissions from individual power plants from space, *Geophys. Res. Lett.*, 44, 10045–10053.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2022), Greenhouse Gas Emissions Information for Decision Making: A Framework Going Forward, *The National Academies Press*, Washington, DC, doi: 10.17226/26641.
- Oda, T., & Maksyutov, S. (2011), A very high-resolution (1 km × 1 km) global fossil fuel CO₂ emission inventory derived using a point source database and satellite observations of nighttime lights, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 543–556.
- Oda, T., & Maksyutov, S. (2015), ODIAC Fossil Fuel CO₂ Emissions Dataset (Version: ODIAC2015), *Center for Global Environmental Research, National Institute for Environmental Studies*, doi: 10.17595/20170411.001.
- Oda, T. et al. (2015), Uncertainty associated with fossil fuel carbon dioxide (CO₂) gridded emission datasets, In: Proc. 4th Int. Workshop on Uncertainty in Atmospheric Emissions, 7–9 October 2015, Krakow, Poland. *Systems Research Institute, Polish Academy of Sciences*, available at: <http://pure.iiasa.ac.at/11888/>
- Oda, T. et al. (2017), On the impact of granularity of space-based urban CO₂ emissions in urban atmospheric inversions: A case study for Indianapolis, IN, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 5, 28, doi: 10.1525/elementa.146.
- Oda, T., Maksyutov, S., & Andres, R.J. (2018), The Open-source Data Inventory for Anthropogenic CO₂, version 2016 (ODIAC2016), *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 87–107.
- Oda, T. et al. (2019), Errors and uncertainties in a gridded carbon dioxide emissions inventory, *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, 24, 1007–1050, doi: 10.1007/s11027-019-09877-2.
- Oda, T., Haga, C., Hosomi, K., Matsui, T., & Bun, R. (2021a), Errors and uncertainties associated with the use of unconventional activity data for estimating CO₂ emissions: the case for traffic emissions in Japan, *Environ. Res. Lett.*, 16, 084058.
- Oda, T. et al. (2021b), US Cities in the Dark: Mapping Man-Made Carbon Dioxide Emissions Over the Contiguous US Using NASA's Black Marble Nighttime Lights Product, In:

- Urban Remote Sensing: Monitoring, Synthesis and Modeling in the Urban Environment, pp. 337–362. Wiley.
- Oda, T., Feng, L., Palmer, P.I., Baker, D.F., & Ott, L.E. (2023), Assumptions about prior fossil fuel inventories impact our ability to estimate posterior net CO₂ fluxes that are needed for verifying national inventories, *Environ. Res. Lett.*, 18, 124030.
- Peters, W. et al. (2007), An atmospheric perspective on North American carbon dioxide exchange: CarbonTracker, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 104, 18925–18930, doi: 10.1073/pnas.0708986104.
- Román, M.O. et al. (2018), NASA's Black Marble nighttime lights product suite, *Remote Sens. Environ.*, 210, 113–143, doi: 10.1016/j.rse.2018.03.017.
- Saito, M., Yamada, H., & Oda, T. (2026), A 1x1 km spatially explicit framework for modeling fossil fuel CO₂ emissions across Japan to support subnational climate mitigation actions, *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*, doi: 10.1007/s11027-026-10313-5.
- Tans, P.P., Fung, I.Y., & Takahashi, T. (1990), Observational constraints on the global atmospheric CO₂ budget, *Science*, 247, 1431–1438.
- Wang, J.S. et al. (2020), The impacts of fossil fuel emission uncertainties and accounting for 3-D chemical CO₂ production on inverse natural carbon flux estimates from satellite and in situ data, *Environ. Res. Lett.*, 15, 085002, doi: 10.1088/1748-9326/ab9795.
- Weir, B. et al. (2021), Regional impacts of COVID-19 on carbon dioxide detected worldwide from space, *Sci. Adv.*, 7, eabf9415, doi: 10.1126/sciadv.abf9415.
- WRI, & WBCSD (2004), The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard, Revised Edition, *World Resources Institute and World Business Council for Sustainable Development*, Washington, DC, USA.
- Wu, D., Lin, J.C., Oda, T., & Kort, E.A. (2020), Space-based quantification of per capita CO₂ emissions from cities, *Environ. Res. Lett.*, 15, 035004, doi: 10.1088/1748-9326/ab68eb.
- Wu, K. et al. (2023), Theoretical assessment of the ability of the MicroCarb satellite city-scan observing mode to estimate urban CO₂ emissions, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 581–602, doi: 10.5194/amt-16-581-2023.
- Yokota, T. et al. (2009), Global concentrations of CO₂ and CH₄ retrieved from GOSAT: First preliminary results, *SOLA*, 5, 160–163.

原稿受領日：2026 年 7 月 27 日

掲載受理日：2026 年 8 月 14 日

著者所属：

1. Universities Space Research Association (USRA);
Department of Atmospheric and Oceanic Science,
University of Maryland, College Park

* 責任著者：

Tomohiro Oda <toda@usra.edu>

日本の温室効果ガスインベントリ

Japan's National Greenhouse Gas Inventory

畠中エルザ^{1, 2*}, 小坂尚史², 尾田武文², 平田絵里子², 伊藤洋²,
林敦子², 秋元さおり²

日本は、パリ協定や国連気候変動枠組条約 (UNFCCC) に基づき温室効果ガスインベントリを提出している。国家インベントリは、国内でどのような温室効果ガスの排出削減、吸収等に関する対策・施策を実施するのかを決定するための前提情報として、またパリ協定の下での NDC (国が決定する貢献) の進捗評価の指標として重要であり、日本では植物の生育に関連する一部の分野・カテゴリーを除き、主に統計等の全国値の活動量、全国一律の排出係数等を用いて年間値が算定されている。長年、毎年の提出が義務付けられてきた先進国の国家インベントリは品質が安定してきている一方で、途上国の国家インベントリは改善の途上にある。国家インベントリの報告ルールは、新しい政策ニーズや、IPCC などにおける科学的知見の深まりに呼応して今後も定期的に変更される可能性がある。

1. はじめに

日本は、毎年 4 月に温室効果ガスインベントリ(目録)を国連に提出し对外公表している。本稿では、国家インベントリ作成の根拠や、日本のインベントリの実務、最新の排出量及び吸収量の状況、その他関連活動について紹介する。なお、本稿における「インベントリ」の文言は国家により作成されたインベントリを指すことに留意されたい。

2. 国家温室効果ガスインベントリ作成の根拠・意義

パリ協定や UNFCCC に基づき、各条約の締約国は温室効果ガスインベントリを提出することになっている。これは、インベントリがそれぞれの国際条約の究極目的の達成に向けてとるべきアクションを決定するための重要な基礎情報となるためである。パリ協定であれば、世界全体の平均気温の上昇を工業化以前よりも摂氏二度高い水準を十分に下回るものに抑えること並びに摂氏一・五度高い水準までのものに制

限するための努力の継続といった、気候変動の脅威に対する世界全体での対応を強化すること、UNFCCC であれば、気候系に対して危険な人為的干渉を及ぼすこととしない水準において大気中の温室効果ガスの濃度を安定化させることが究極目的として設定されている。

各国のレベルでもこれは同様であり、それぞれの国が国内でどのような温室効果ガスの排出削減、吸収等に関する対策・施策を実施するのかを決定するための前提情報として、インベントリは重要になる。日本では、「地球温暖化対策の推進に関する法律(平成 10 年法律第 117 号)」に基づいて、毎年、温室効果ガスの排出量及び吸収量を算定し、公表することとなっている。また、政府は、地球温暖化対策の総合的かつ計画的な推進を図るため、地球温暖化対策に関する計画(「地球温暖化対策計画」)を定め、その進捗状況を点検することになっている。インベントリはその進捗点検の最も重要な参考情報であり、日本としてパリ協定の下での NDC の進捗評価の指標とし

て用いる旨も、NDC 本体や、インベントリ情報、政策・措置、NDC の進捗状況、将来予測、支援の提供状況等を提出する媒体である隔年透明性報告書 (Biennial Transparency Report:BTR) で報告している。

3. 日本のインベントリ

日本国の温室効果ガスインベントリは、1994 年より国別報告書というインベントリ情報、政策・措置、将来予測、支援の提供状況等を報告する報告書の一部として、その後インベントリ単体で毎年、国連に提出している。現在は環境省がその作成に対する責任機関として、また、国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスが作成作業機関として位置付けられている。

インベントリ作成に用いる算定方法は、環境省の下に設置されている温室効果ガス排出量算定方法検討会(関連分科会を含め 70 名程度の学識者・業界団体等の委員で構成)により決定され、統計や関係省庁・業界団体等からの提供データを使用して算定されている。基本的に、IPCC の国家インベントリ算定のためのガイドラインである 2006 年 IPCC ガイドライン等に従って算定されているが、そこに示されている Tier という概念で、一定の枠の中ではあるが算定の複雑さ・詳細さのレベルを各国が自己決定できることになっており、部分的に国独自の等方法を使用している。なお、同ガイドラインでは、インベントリの品質は、透明性、完全性、一貫性、比較可能性、正確性がその指標となるとされている。透明性は、インベントリがどのように作られたかが外部者にも分かるよう説明されているか、完全性は、すべての排出源・吸収源、対象ガスについて、また地理的に網羅的な報告がされているか、一貫性は、算定方法やデータが時系列にわたり一貫しているか、比較可能性は、他国と比較できるように報告されているか、正確性は、可能な限り過大でも過小でもない推計となっているか、を指している。各年の年間値データは、1990 年以降、報告年の 2 年前までのものを毎年提出している。

排出量及び吸収量は、エネルギー・工業プロセス及び製品の使用・農業・土地利用、土地利用変化及び林業・廃棄物の 5 分野の人為起源の排出源・吸収源について算定され、CO₂、CH₄、N₂O、HFCs、PFCs、SF₆、NF₃ の 7 つの温室効果ガスについて報告義務が課せられている。その他、努力義務に留まるが、前駆物質等の NO_x、CO、NMVOC、SO_x も報告することとなっている。

パリ協定の下でのインベントリ報告は、日本の場合には国家インベントリ報告書 (National Inventory Document:NID) と共通報告表 (Common Reporting Tables:CRT) で構成されている。前者では、算定方法等が文章や表で詳述され、後者は算定の結果得られた排出量及び吸収量等が各国間で比較しやすいエクセル表形式で示されている。これら報告には、国独自の見出し・項目を追加等することは可能ではあるが、概ね各国共通の形式となっている。但し、途上国は NID を単独の文書として作成してインベントリを詳細に説明するのではなく BTR の一部として含めているケースがある。なお、日本を含めた各国の提出物は国連のウェブサイトにて参照可能である。

排出量(及び吸収量)の一般的な計算方法は、活動量×排出係数(吸収係数)×該当するガスの地球温暖化係数である。活動量は、ある排出や吸収を生じさせる人為的活動の量、排出係数(吸収係数)は、活動量あたりの排出量(吸収量)である。地球温暖化係数は、温室効果の程度を CO₂ の同効果に対する比で示したもので、現在、IPCC 第五次評価報告書の 100 年値が使用されている。なお、植物の生育などに関連する農業や森林等吸収源の分野では、数値モデル等を使用して計算することもある。また、すべてのガスの排出量及び吸収量の CO₂ 換算値を合計して国全体の値を求める。

使用する活動量や排出係数・吸収係数、関連パラメータに関しては、エネルギー起源の CO₂ をはじめとしたインベントリの大きな部分は、統計等の全国値、全国一律の係数等の適用が多い。かたや、農業や

森林等吸収源の分野では、気温などの環境条件を考慮して地域別に活動量や排出係数・吸収係数、パラメータを細分化して算定しているケースがある。なお、インベントリの算定に使用する統計は、多くの場合、インベントリ作成とは別の目的で元々編纂されている。国の重要な統計である基幹統計であれば、回答義務もあり、広く全国の事業所から調査票（インベントリと関係しない様々な調査項目を含む）が集められ、所管省庁が全国値等のデータを取りまとめている。

算定方法は、データ提供者・関係機関からのヒアリング等を経て検討会事務局において素案が作成され、検討会において精査・決定される。ゆえに、算定方法や使用するデータについて、関係者間の合意があると言え、また、何を減らせば・増やせば、排出量が減じる・吸収量が増加するかについても緩やかな共通理解があると言える。

日本の算定方法は先に述べた NID において、また、各年の排出源・吸収源ごと、ガスごとの詳細データは CRT において詳細を公開しており、適宜参照されたい。なお、NID では、その他、国家インベントリに関する制度的取決め、国全体の排出量及び吸収量の推移、前回報告以降の修正（再計算）箇所、不確実性評価、品質保証・品質管理などの情報も提供している。

4. 日本の最新の排出量及び吸収量の状況

今年(2026 年)は正式期限の 4 月 15 日を前に、1990～2024 年度分の最新のインベントリを 4 月 14 日に国連提出・対外公表した。2024 年度の我が国の温室効果ガス排出・吸収量（森林等の吸収源対策による吸収を加味）は、約 9 億 9,400 万トン（二酸化炭素（CO₂）換算、以下同じ。）となり、2023 年度比で 1.9%（約 1,880 万トン）の減少、日本の NDC の基準年である 2013 年度比では 28.7%（約 3 億 9,950 万トン）の減少となった。2023 年度からの減少要因は、製造業の生産量の減少等によるエネルギー消費量の減少

及び電力の脱炭素化（原発再稼働及び再エネ拡大）に伴う電力由来の CO₂ 排出量の減少、2013 年度からの減少要因は、エネルギー消費量の減少（省エネの進展等）及び電力の脱炭素化に伴う電力由来の CO₂ 排出量の減少等で、2023 年度比と類似の要因となっている。

なお、NDC の進捗評価に用いる森林等の吸収源対策による吸収量は、特定の活動による努力量だけを吸収量として認めていた京都議定書の考え方の流れを汲む計上方法となっているが、基礎となる算定方法は UNFCCC の下の土地利用、土地利用変化、及び林業分野の報告で用いているもの（当該分野の対象地におけるすべての人為的排出量及び吸収量を含むもの）と同様である。

5. 定期報告と継続的改善

インベントリは、国際的には、その国の NDC の進捗評価や、パリ協定のグローバルストックテイク（世界全体としての排出削減等の進捗状況の評価）等に用いられるため、適時に提出していない場合や、「重要かつ持続的な（ルールとの）不整合」がある場合には、パリ協定の遵守委員会で遵守状況を問われる可能性がある。また、過去に UNFCCC 締約国会議（COP）などの場で類似の報告書の未提出が取り上げられ批判されることもあったため、各国ともタイムリーな提出の義務を真摯に受け止め、日々努力している。

なお、インベントリには、継続的に改善を行うべきという大原則があるため、データが入手可能になった場合や、より適切な算定方法に変更する必要が生じた場合、誤りが特定された場合は、インベントリの修正が推奨されている。また、排出量及び吸収量の推移を正しく把握するために、データの時系列の一貫性の確保が重要視されており、算定方法やデータソースの変更は、基本的に過去年まで遡って適用することになっている。つまり、ある年に提出・対外公表したインベントリ（過去年分を含む）が過去に提出・対外公表したものと異なる、いわゆる「再計算」が生じる。

再計算が認められる背景には、インベントリの作成に必要なデータ・情報は多種多様に・大量にあり、国の中の状況によって使用できるデータが変わる可能性や、ある国のある排出源の排出量を計算するにも、簡易な手法や複雑・詳細な手法があり、例えば排出削減施策の効果を明確にする、といった政策ニーズに対応して手法を精緻化させるという選択をする可能性、あるいは時に人為的な誤りを含みうる可能性なども織り込んでいっているものと思われる。

つまり、定期報告が必要とされている中で、再計算は生じうることであり、定期的に報告しながら継続的に改善すればよいという考え方でインベントリは作成されていると言える。

6. 品質保証, 審査

インベントリの確からしさの確保については、作成者側が実施する品質管理活動(データ提供者による確認作業等を含む)に加え、外部有識者等による品質保証活動が行われている。具体的には、インベントリ作成に直接関与していない専門家に依頼して、排出源・吸収源ごとに算定方法、活動量、排出係数・吸収係数等、また、NID 及び CRT における報告内容の妥当性を詳細に評価してもらうことにより、改善点を抽出してもらい、これを可能な限りインベントリに反映することとしている。

また、国際的には、パリ協定の下では、インベントリ提出ののち、BTRとあわせて技術専門家審査が行われ、進捗の促進的な多国間検討(Facilitative, Multilateral Consideration of Progress: FMCP)という、関連事項についての公開の場での質疑応答等のプロセスを経て、1つのサイクルが完了する。上述のパリ協定の遵守委員会の「重要かつ持続的な不整合」の指摘がどれくらい発動されることになるかは、まだ最初のサイクルが完了しつつある中であり今は未知数であるが、審査で指摘された問題が長く解消されないと遵守状況を問われる可能性が出て来たり、FMCPなどの公開の場で対応状況を問われることも

増えてくると思われる。

7. 途上国のインベントリ・今後に向けて

先進国のインベントリは 1990 年代から長期にわたって継続的に報告してきていることや、審査を経て改善が進み品質が安定してきている一方で、途上国のインベントリは改善の途上にある。パリ協定以前は、途上国と先進国のインベントリの品質やカバー範囲に大きな差があったが、パリ協定以後は、報告ルールが強化され、途上国も段階的に先進国並みのインベントリを整備していくことを求められているため、徐々にその差は縮まっていくと考えられる。報告の品質やカバー範囲の向上が必要な部分は広くインベントリの全 5 分野の排出源・吸収源において存在し続けるだろうが、例えば冷媒等に用いられる HFCs 等のフッ素系ガスについては、インベントリ作成能力が向上したら報告すればよいという寛容な報告ルールとなっていることもあり、まだしばらく報告の欠損が生じると考えられる。

途上国におけるインベントリ作成能力の強化の重要性に鑑み、日本国環境省と国立環境研究所温室効果ガスインベントリオフィスでは、コロナ禍の 2020 年度を除き、2003 年度から毎年「アジアにおける温室効果ガスインベントリ整備に関するワークショップ(Workshop on Greenhouse Gas Inventories in Asia: WGIA)」を開催して、アジア地域諸国の温室効果ガスインベントリの精度向上と、地域の協力関係を促進する活動を行っている。開催は、基本的に域内の持ち回りとなっており、域内各国のインベントリ関係者や、ホスト国のインベントリのコアチーム以外の関係者を含め幅広い参加を得ている。

国家インベントリの報告ルールは新しい政策ニーズや、IPCC などにおける科学的知見の深まりに呼応して今後も定期的に変更される可能性がある。報告ルールの変更は、これまで先進国のニーズへの対応が主だったが、これからは途上国のニーズへ軸足が移っていくと考えられ、日本を含めた各国は報告ル

ールを丁寧に確認して対応していくことになる。

参考文献

環境省, パリ協定 和訳

<https://www.env.go.jp/content/900444088.pdf>

環境省, 気候変動に関する国際連合枠組条約 和訳

<https://warp.ndl.go.jp/web/20220602042201/www.env.go.jp/earth/cop3/kaigi/jouyaku.html>

地球温暖化対策の推進に関する法律(平成 10 年法律第 117 号)

日本国の第 1 回隔年透明性報告書

<https://www.env.go.jp/content/000269501.pdf>

IPCC (2006), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement (2018), Decision 18/CMA.1 Modalities, procedures and guidelines for the transparency framework for action and support referred to in Article 13 of the Paris Agreement.

First Biennial Transparency Reports <https://unfccc.int/first-biennial-transparency-reports>

環境省報道発表「2024 年度の我が国の温室効果ガス排出量及び吸収量について」

国立環境研究所報道発表「2024 年度の我が国の温室効果ガス排出量及び吸収量について」

Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Paris Agreement (2018), Decision 20/CMA.1 Modalities and procedures for the effective operation of the committee to facilitate implementation and promote compliance referred to in Article 15, paragraph 2, of the Paris Agreement.

IPCC (2019), 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.

著者所属:

1. 国立環境研究所 地球システム領域 地球環境研究センター エミッション統合評価推進室

2. 国立環境研究所 地球システム領域 地球環境研究センター 温室効果ガスインベントリオフィス

* 責任著者:

Elsa Hatanaka <hatanaka.elsa (後ろに半角で @nies.go.jp をつけてください。)>

原稿受領日: 2026 年 6 月 29 日

掲載受理日: 2026 年 7 月 28 日

アジア域を対象とした大気汚染物質及び短寿命気候強制因子(SLCFs)の排出インベントリ

Emission inventories for air pollutants and Short-Lived Climate Forcers (SLCFs) in Asia

黒川純一^{1*}

アジア域は、現在世界で最も大気汚染物質、短寿命気候強制因子(Short-Lived Climate Forcers (SLCFs))を排出する地域となっている。一方で、アジア域は社会状況の変化が速い地域でもあり、大気汚染物質、SLCFs の排出量、排出構造は複雑に変化している。大気汚染と気候変動の問題は一体的に考える必要があり、アジア域はその観点においても重要な地域である。よって、アジア域の現況排出量、及び、過去から現在にかけての排出量の変化とその要因を把握しなければならない。その目的のために必要となるのが排出インベントリである。本稿では、アジアを対象とした大気汚染物質及び SLCF 排出インベントリについて概説する。

1. はじめに

アジア域は、その急速な経済成長・人口増加がエネルギー、自動車による輸送、工業製品・農作物などへの需要の増加をもたらし、その結果、世界で最も大気汚染物質、気候変動関連物質を排出する地域となっている[Guizzardi et al., 2025]。大気汚染の激しい地域では、健康への悪影響、農作物生産量の減少、視程の悪化による危険など、日常生活にも深刻な影響を与えている。一方で、発生源対策導入の効果により、排出量の削減、もしくは、増加の抑制が進んでいる国も存在している。アジア域は社会状況の変化が速い地域であり、大気汚染物質や気候変動関連物質の排出量と排出構造は複雑に変化している。

気候変動問題については、気候変動枠組条約のパリ協定における合意を実現するため、各国はそれぞれの緩和目標に向け、長寿命温室効果気体排出量の削減に取り組んでいる。しかしながら、パリ協定の目標と各国の状況とは大きな隔りがあるのが

実情である。更に、極端気象現象の増加や、夏季の最高気温の大幅な上昇が顕著となるなど、気候変動の影響が顕在化しつつあることが指摘されている。従って、長期的に気候変動を抑制するための対策だけでなく、できるだけ早く気温上昇を抑制するなど、短期間での効果が必要な対策も求められる状況となっている。そこで、重要性が増してきているのが、比較的大気中の寿命が短く、気候(温暖化・寒冷化双方)に影響を与える物質である短寿命気候強制因子(Short-Lived Climate Forcers (SLCFs))である。SLCFs による効果的な気候変動の緩和策について、研究が進められている。

大気汚染と気候変動の問題を一体的に考えることの重要性は、現在では当然のものとなっているが、その観点においてもアジア域は重要な地域である。長寿命温室効果気体については、大気汚染物質と共通の発生源が多く存在しており、その排出量の削減は、大気汚染・地球温暖化同時緩和の共便益をもた

らすことが期待される。一方, SLCFs による地球温暖化と大気汚染の同時緩和については単純に考えることができない。SLCFs には温暖化に作用する物質, 寒冷化に作用する物質が存在し, 両者には共通の発生源が少なくないため, 効果的に地球温暖化を緩和する削減策を見つけることは容易ではない。例えば, 硫酸エアロゾルや硝酸エアロゾルは, 大気汚染物質である PM_{2.5} の主要成分だが, 同時に寒冷化に寄与する(その削減が温暖化を促進する側面を持つ)主要な SLCFs でもある。この関係により, SLCFs による地球温暖化と大気汚染の同時緩和は, 大気汚染対策の緊急性が高い国が多いアジア域において, より複雑な課題となる。

これらの問題を議論するためには, 第一に現況排出量が正確に把握されていなければならない。更に, 過去から現在にかけての大気汚染, 気候変動の変化について理解するためには, 排出量の変化とその要因についても把握しなければならない。その目的のために必要となるのが排出インベントリである。本稿では, アジアを対象とした大気汚染物質及びSLCF 排出インベントリの現状と課題点を概説する。

2. アジア域を対象とした大気汚染物質・SLCF 排出インベントリの発展

アジア域を対象に含む大気汚染物質, SLCFs の排出インベントリは, 過去から現在にかけ, 様々なものが開発され, 改良が続けられている。ここでは, 代表的な排出インベントリを紹介する。なお, 本稿では, 活動量(エネルギー消費量, 自動車走行距離など)と, 対応する排出係数(単位活動量当たりの排出量)などを用いて排出量を推計する, ボトムアップ型排出インベントリを対象とする。また, SLCF 排出インベントリの対象物質は, 後述する IPCC SLCF 排出インベントリ方法論報告書の対象物質とする(4.3 節参照)。

2.1 アジア域を対象とした主な排出インベントリ

アジア全域を対象として開発された最初の排出イ

ンベントリは, *Kato & Akimoto* [1992]である。1975, 1980, 1985-1987 年の SO₂, NO_x 排出量が推計され, *Akimoto & Narita* [1994]により 1°×1°にグリッド化された。このデータは, GEIA (Global Emissions InitiAtive) version 1 に組み込まれ, 世界の研究者に向けて公開されたが, 当時はまだモデル(本稿では大気質モデル, 化学気候モデルなど)研究での活用は限定的であった。*Streets et al.* [2003a, b]は, 2000 年を対象とし, 主要な大気汚染物質, 発生源を含む総合排出インベントリを開発した。これは, TRACE-P (Transport and Chemical Evolution over the Pacific) 観測計画のモデル研究のために開発された排出インベントリであり, アジア域を対象とした多くのモデル研究で活用された。また, INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B) 観測計画 (TRACE-P の後継ミッション) に対しては, *Zhang et al.* [2009]が 2006 年を対象としたアジア域排出インベントリを開発し, これも様々なモデル研究に活用された。

この様に, 排出インベントリの重要な用途の一つがモデル入力データとしての活用である。その様なデータを作成するため, 近年ではモザイク型排出インベントリが開発が行われている。これは, 全球または対象領域に含まれる信頼性の高い排出インベントリを組み合わせることで, 高精度の全球・領域排出インベントリを開発するアプローチである [*Janssens-Maenhout et al.*, 2015; *Guizzardi et al.*, 2025]。アジアにおけるモデル間相互比較研究 (Model Intercomparison Study for Asia (MICS-Asia)) は, アジアを対象とした大気質モデル・化学気候モデルの精度向上を目的として実施されているプロジェクトであり, モデル入力データとして, モザイク型アプローチによる MIX inventory (mosaic Asian anthropogenic emission inventory) を開発している [*Li et al.*, 2017; *Li et al.*, 2024]。最新の MIX version 2 (MIXv2: 対象期間 2010-2017 年) [*Li et al.*, 2024] では, 信頼性の高い国別排出インベントリとして, 日本は, 固定発生源に

J-STREAM (Japan's Study for Reference Air Quality Modeling) [Chatani *et al.*, 2018], 移動発生源に環境省 PM_{2.5} 等大気汚染物質排出インベントリ [Shibata & Morikawa, 2021], 中国は MEIC (Multi-resolution Emission Inventory for China) [Li *et al.*, 2017], 韓国は CAPSS (Clean Air Policy Support System) [Lee *et al.*, 2011] などが使用されている。それら以外の国の排出インベントリについては、MIXv2 の対象期間を網羅する包括的な排出インベントリが存在しないため、デフォルト排出インベントリとして、アジア域排出インベントリ REAS (Regional Emission inventory in ASia) version 3 (REASv3) [Kurokawa & Ohara, 2020] が使用されている。REAS については、次節にて紹介する。

ここでは、アジア全域を対象とした排出インベントリから主なものを紹介したが、近年、他にも多くのアジア域、アジア諸国を対象に含む排出インベントリが開発・発表されてきている。必要に応じて文献検索などで当たっていただきたい。

2.2 アジア域排出インベントリ REAS の変遷

本節では、筆者が開発に携わってきたアジア域排出インベントリ REAS について、その変遷を紹介する。2000 年頃のモデル研究では、アジア域を対象とした排出インベントリが不足している状況であった。そこで、当時の地球フロンティア研究システム (現海洋研究開発機構) において、アジア域排出インベントリ REAS を開発するプロジェクトが開始された。その初代である REAS version 1 (REASv1) [Ohara *et al.*, 2007] は、東、東南、南アジアを対象領域、SO₂, NO_x, CO, NMVOC, BC, OC, NH₃, CH₄, N₂O, CO₂ を対象物質とし、1980-2003 年 (過去), 2010, 2020 年 (将来) の各国・地域の年間排出量、及び 0.5°×0.5° のグリッドデータが作成され、多くのモデル研究で活用された。しかしながら、2000 年代初頭より、急激な経済成長とともに中国の大気汚染物質排出量が大幅に増加し、越境大気汚染の影響評価が

研究の対象になると、REASv1 の対象期間では対応できないため、期間の延長が必要となった。

そこで開発された REAS version 2 (REASv2) [Kurokawa *et al.*, 2013] では、対象年を 2000-2008 年とし、対象物質に PM₁₀, PM_{2.5} を加え、水平分解能を 0.25°×0.25°, 時間分解能を月間排出量とそれぞれ細分化した。グリッド化においては、点源としての大規模発電所の情報を全面的に更新した。また、鉄鋼、セメント生産起源排出量のグリッド化では、それぞれの大規模工場に関する情報を使用した。これらの更新は、モデルによる越境大気汚染の評価に活用されることを念頭において行われ、REASv2 も様々なモデル研究で活用された。

大気汚染における越境影響の評価は、現在でも重要な課題である。しかしながら、気候変動問題の重要性が急激に上昇し、短寿命気候汚染物質 (Short-Lived Climate Pollutants (SLCPs)) が注目される様になった。SLCPs は温暖化に影響を与える上に、大気中の寿命が比較的短い物質である。SLCPs の中でも、特にオゾンとブラックカーボンは大気汚染物質でもあるため、大気汚染・気候変動同時緩和の共便益が期待された。そこで、REASv3 では、REASv2 の対象物質の内、大気汚染物質・SLCPs の双方に関わる物質にフォーカスし、1950-2015 年を対象とした長期ヒストリカル排出量データを作成した。REASv3 では、アジア域の過去約 65 年の大幅な排出量の増加傾向を明らかにするとともに、日本、中国の発生源対策の効果を長期的に評価した [Kurokawa & Ohara, 2020]。

第 1 章で述べた通り、大気汚染・気候変動の同時緩和を考える場合、SLCPs の観点のみでは不十分であり、温暖化・寒冷化双方に影響を与える SLCFs の観点が必要である。REAS は、4.3 節で紹介する IPCC SLCF 排出インベントリ方法論報告書の対象物質を全て含んでいる。現バージョンである REAS version 4 (REASv4) では、IPCC SLCF 排出インベントリ方法論報告書を用いた排出量推計に貢献することを念頭に置き、開発が継続されている。

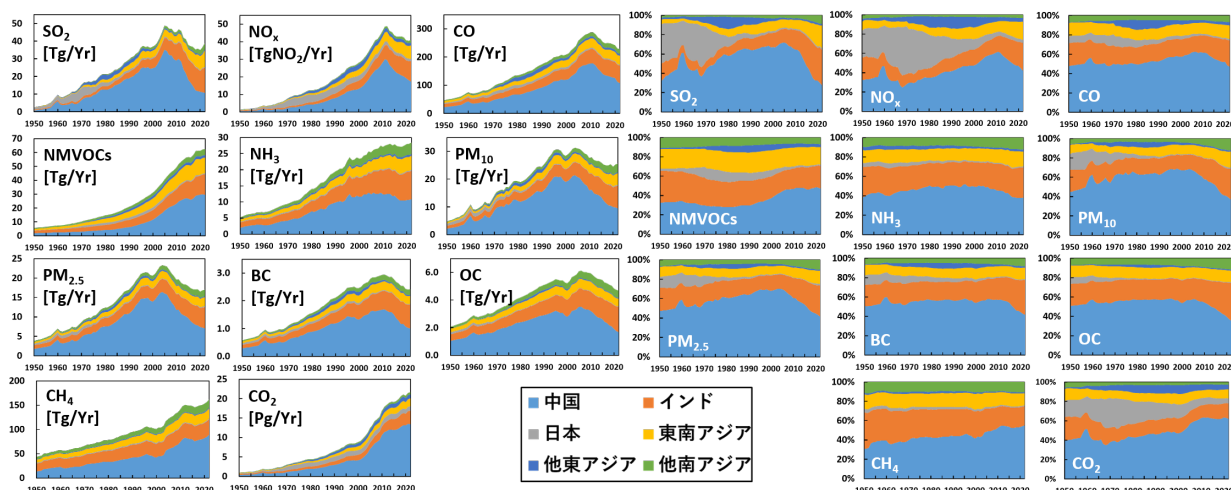


図 1 アジアの主要国・地域における(左)SLCFs 関連物質排出量及び(右)排出量比率の長期トレンド(1950–2022 年)。他東アジアは中国・日本を除く東アジア, 他南アジアはインドを除く南アジア。

3. アジア域における大気汚染物質・SLCFs 関連物質排出量の近年の変動

ここでは, 対象年を 2022 年まで延長した REASv4 の結果を用い, アジア域の主要国・地域における大気汚染物質・SLCFs 関連物質排出量の長期トレンド, SO_2 , NO_x , BC, 及び OC 排出量の近年の変動を概説する。

3.1 アジア域の主要国・地域における大気汚染物質・SLCFs 関連物質排出量の長期トレンド

図 1 は, REASv4 によって推計された, 中国, インド, 日本, 東南アジア, 他東アジア(中国・日本を除く東アジア), 他南アジア(インドを除く南アジア)における, 大気汚染物質・SLCFs 関連物質排出量の 1950–2022 年のトレンドを示したものである。全ての物質について, この約 70 年間で排出量が大幅に増加したことが見て取れる。一方で, 増加の特徴, 増加率, 最近のトレンドについては物質によって差が存在する。 SO_2 , NO_x , NMVOCs, CO_2 は 1950 年からピーク年までの増加率が大きい。一方, CO, NH_3 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, BC, OC, CH_4 の増加率はやや小さい。この違いは, 各物質の発生源の違いによる。 SO_2 , NO_x , CO_2 は, 発電所や工場における大規模燃焼の寄与分が大きい。更に, モータリゼーションが大幅に進行したアジア域においては, 自動車起源排出量の寄与分が重

要となる。これらが過去から現在にかけての排出量の大幅な増加に寄与している。NMVOCs については, 大規模燃焼からの寄与分は限定的だが, 他の物質とは異なる発生源として, 塗料, 溶剤の使用, 有機化学製品製造, 化石燃料の漏洩, 自動車ガソリン燃料などからの蒸発発生源が存在する。NMVOCs の近年の大幅な増加についてはこれらの寄与分が大きい。一方, CO, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, BC, OC では, 発電所や工場における燃料の完全燃焼からの寄与分は比較的小さく, アジアでは, 家庭などにおける, Biofuel を含む小規模燃焼からの寄与分が比較的大きい。また, NH_3 は, 大部分が化学肥料, 有機肥料の施用, 家畜糞尿管理などの農業起源である。また, CH_4 は, 近年の増加には中国の石炭採掘起源が大きく寄与しているが, 過去の時点より稲作, 家畜消化管内発酵, 家畜糞尿管理などの農業起源の寄与分も大きい。これらの発生源についても, 過去から現在にかけて排出量は増加しているが, 大規模発生源からの寄与分に比べると増加率はやや低い。これらの特徴が, 排出量の増加率における物質毎の違いを生み出している。

アジアの大気汚染物質・SLCFs 関連物質排出量は, 1950 年からこの約 70 年内のピーク時まで大幅に増加したことが確認されたが, SO_2 (2005 年), NO_x (2012 年), CO (2010 年), $\text{PM}_{2.5}$ (2004 年), PM_{10}

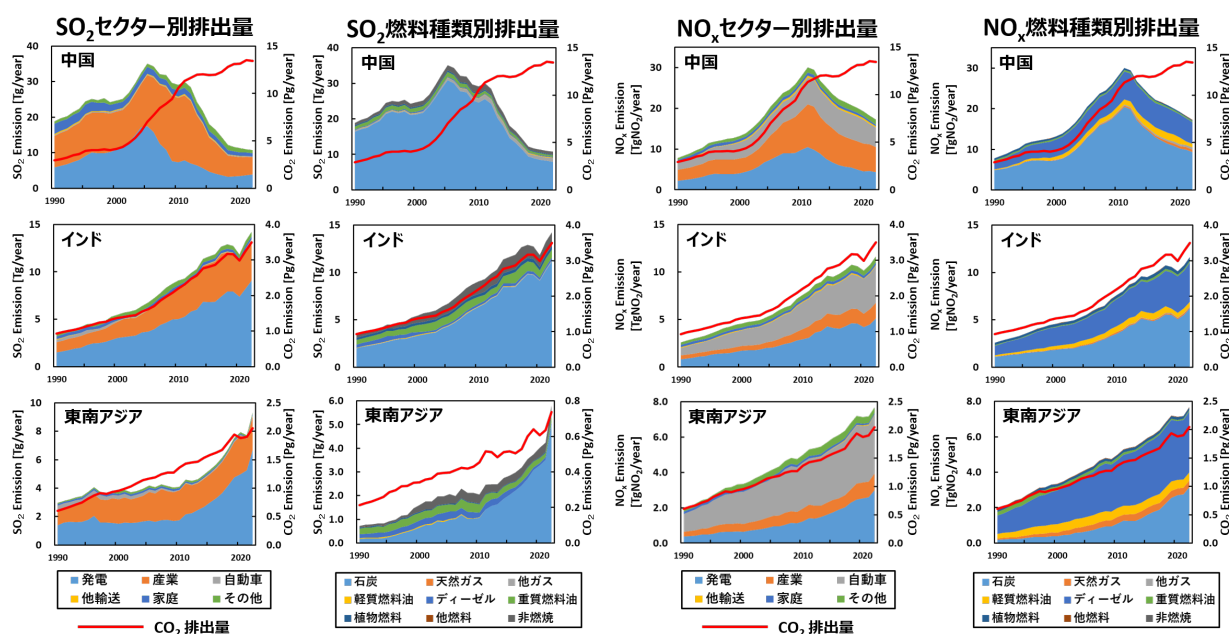


図 2 中国、インド、東南アジアにおける(左2列)SO₂ セクター別・燃料種類別排出量、(右2列)NO_x セクター別・燃料種類別排出量の1990-2022年におけるトレンド。赤線はCO₂排出量(単位右軸)。

(2004年), BC(2011年), OC(2006年)については、近年は減少に転じている(括弧内は, REASv4 によるアジア総排出量におけるピーク年)。この近年の減少トレンドは、主にアジア全域に対する排出量の割合の大きい中国の排出量の時系列変化と連動しており、2000年初頭以降に激甚化した大気汚染に対応するため、国家計画として実施された発生源対策による効果と考えられている。その結果、アジア域に占める中国の比率は2022年においても大きい、ピーク時に比べて中国の比率が減少している物質も多い。SO₂やOCではインドの比率が中国を凌駕し、SO₂については、東南アジアの比率は中国と同等となっている。また、NO_xについては、2022年でも中国の割合が高いが、インドと東南アジアの合計は中国と同等となっており、アジア全域の排出状況は大きく変化していることが示されている。

3.2 SO₂ 及び NO_x 排出量の近年のトレンド

図2は、中国、インド、東南アジアにおける1990-2022年のSO₂, NO_x排出量について、主要セクター別、燃料種類別に積み上げて示したものである。赤

線はCO₂の総排出量であるが、CO₂の排出量は基本的に燃料消費量に依存するため、発生源対策が行われなかった場合の排出量のトレンドの目安として示されている。

SO₂については、石炭燃焼からの寄与分が大部分を占めていることが特徴的である。これは、SO₂の生成には硫黄分が必要であり、他の燃料種類に比べ、石炭は燃料に含まれる硫黄分の割合が高いことによる。発生源については、発電所及び産業からの排出量の寄与分が総排出量の大部分を占めている。これは、アジア域の発電所、工場においては石炭の消費量が多いことに加え、発電所や大規模工場では石炭が高温で燃焼されるため、灰分に残り残される硫黄分の量が少なく、大部分がSO₂として排出されることによる。中国については、2000年代初頭から排出量が急増したが、2005年をピークに排出量が大きく減少に転じている。これは、中国の5カ年計画により、2006年からSO₂の発生源対策に重点が置かれたため、まず石炭火力発電所、続いて大規模工場への対策が実施され、脱硫装置の導入や、古い発電所の廃止と発生源対策の導入された発電所への置き換

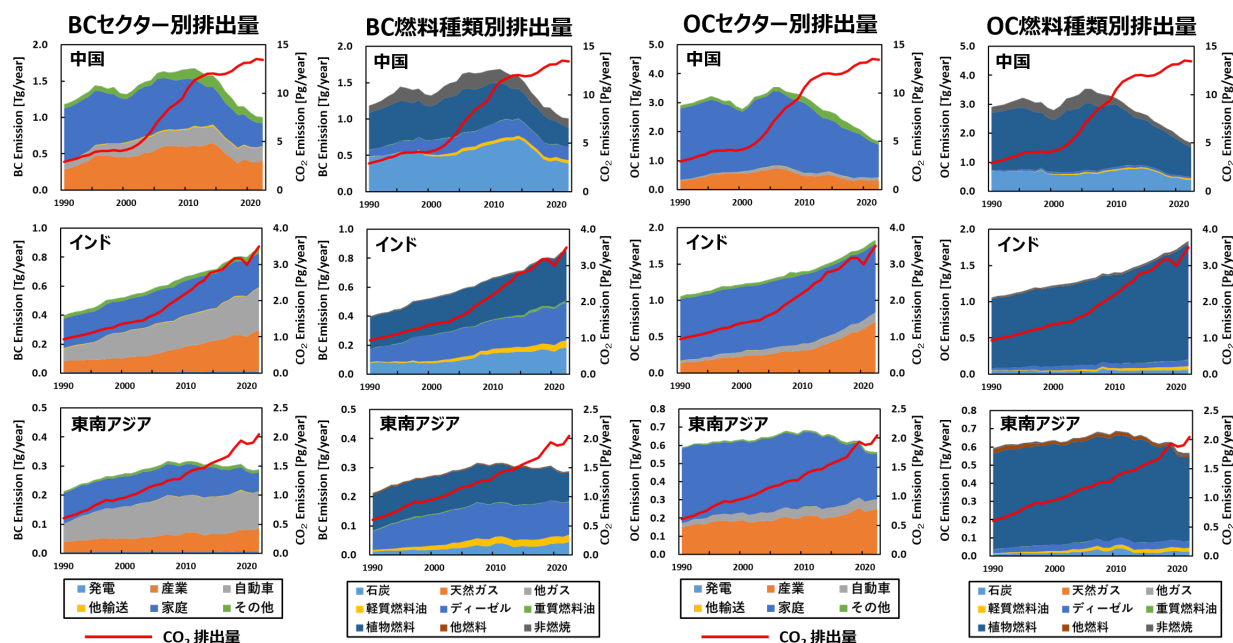


図 3 中国、インド、東南アジアにおける(左2列)BC セクター別・燃料種類別排出量、(右2列)OC セクター別・燃料種類別排出量の 1990–2022 年におけるトレンド。赤線は CO₂ 排出量(単位右軸)。

えなどが行われた。インドについては、1990 年から 2022 年まで基本的には増加傾向が続いており、2022 年の排出量は 1990 年の 4 倍以上となっている。東南アジアでは、タイにおいて、1990 年代の深刻な大気汚染の対策のため、大規模発電所への脱硫装置の導入などが行われたが、全体としては排出量の増加傾向が続いている。

NO_xについては、SO₂の場合と同様に、発電、産業における石炭燃焼起源の寄与分は大きい、自動車起源の寄与分も大きい。自動車起源では、乗用車における自動車ガソリン燃焼以上に、貨物車におけるディーゼル燃焼の寄与分が重要である。中国については、主に発電所、工場における石炭燃焼量の増加に伴い、2000 年代初頭より排出量の増加率が上がっている。この傾向は SO₂ の場合と同様だが、SO₂ の場合と異なり、2006 年以降も排出量は増加が続いており、その後 2012 年より減少に転じている。これは、中国において、NO_x に対する国家的な対策が始まったのが SO₂ より約 5 年遅れたためだが、特に大規模発電所や工場への脱硝装置の導入により、2012 年以降は排出量の減少傾向が続いている。ただし、ピ

ーク時からの減少幅は、SO₂ の場合に比べて小さい。これは、脱硫装置に比べ、脱硝装置の方が技術的、コスト的に削減効率を上げることが難しいこと、また、燃料中の硫黄分のみに依存する SO₂ と異なり、燃料転換や燃料性状の改善による排出量の低減効果が限定的であることがその要因として考えられる。インド、東南アジアについては、主に発電所による石炭燃焼、及びディーゼル車からの排出により、1990–2022 年で基本的に排出量の増加傾向が続いている。

3.3 BC 及び OC 排出量の近年のトレンド

図 3 は、中国、インド、東南アジアにおける 1990–2022 年の BC、OC 排出量について、主要セクター別、燃料種類別に積み上げて示したものである(赤線は CO₂ の総排出量)。

BC については、全ての国において総排出量に対する発電起源の寄与分が極めて少ない。これは、BC は主に燃料の不完全燃焼によって発生するため、発電所における高温での燃焼からの排出の寄与分はほとんど存在しないことによる。BC の排出量は、家庭や産業セクターにおける Biofuel 燃焼の寄与分が比

較的大きく、特に家庭起源の寄与率は過去ほど大きい傾向がある。一方、自動車起源排出量の寄与分も比較的大きいが、ほとんどがディーゼル車からの排出によるものである。中国の排出量は、1990 年から 2011 年までゆるやかな増加を示している。産業起源排出量は 2014 年まで増加傾向にあるが、煤塵に対する発生源対策は比較的早めに始まっており、また、大規模工場からの寄与分は比較的少ないため、SO₂ や NO_x に比べて増加率は低い。家庭起源排出量は、過去では寄与分が大きかったが、都市域において天然ガスなどの比較的クリーンな燃料への転換が進み、2022 年の家庭起源排出量の総排出量に対する割合は低下している。インドの総排出量は、1990 年から 2022 年までほぼ単調に増加している。排出構造については、過去は家庭起源からの寄与分が最大であったが、近年では自動車起源、産業起源の方がやや大きくなっている。東南アジアでは、1990 年では家庭起源、自動車起源がほぼ同等で、自動車起源がやや増加しているが、2010 年頃より家庭起源の排出量が減少している。これは、特にインドネシアにおける Biofuel 消費量の減少による。タイ、ベトナムなどでも、近年は Biofuel 燃焼の寄与分は低下傾向にある。

OC については、全ての国において、Biofuel 燃焼を起源とする排出量の割合が他の物質に比べて大きく、総排出量の大部分を占めていることが特徴的である。従って、排出量の変化は、基本的に Biofuel 消費量の変化に連動している。中国についても大部分は家庭における Biofuel 燃焼だが、中国では石炭燃焼の寄与分も見られている。発生源は、大部分が家庭起源、次いで産業起源であり、BC の場合と同じ理由により、発電所起源の割合は極めて微小である。インド、東南アジアではほぼ Biofuel 燃焼を起源としているが、中国に比べ産業起源の寄与分はやや高い。Biofuel は、アジアにおいては重要なエネルギーの一つであるが、その消費量の管理については、国家において重要な燃料である主要化石燃料と比べて対応の優先度は低いと考えられる。よって、一般的に

Biofuel 消費量の不確実性は大きいと考えられている。特に BC、OC において重要な発生源である家庭に対しては、Biofuel 消費量の精確な把握はより困難と考えられ、排出量推計結果の検証においては、モデル、観測の活用も必要である(4.2 節参照)。

4. 排出インベントリの課題点

アジア域、アジア諸国を対象に含む排出インベントリは、様々な研究機関、プロジェクト、研究者、専門家らの努力により、全球、領域、各国をターゲットとして、大きく進展してきた。国レベルで見ると充実度に差はあるものの、Better than nothing の時代は過去のものとなり、データの改良・精緻化を進める段階に入っている。ここでは、現在の大气汚染物質・SLCF 排出インベントリの課題点を概観する。

4.1 排出インベントリの高度化

2 章でも記載した通り、排出インベントリの主要な用途の一つはモデル入力用データである。計算機能力の大幅な向上に伴い、排出インベントリに求められる水平分解能も上がっている。現在は、全球排出インベントリでも 0.1°×0.1°が標準となっており、国別排出インベントリでは 1 km×1 km クラスが求められる。また、モデル入力データとしては、鉛直プロファイルも必要となる。時間分解能については、全球排出インベントリでも月別データが標準であり、モデル入力データとしては、日内変動、週内変動の情報も提供されることが望ましい。これら空間・時間高分解能排出量データを作成するためには、各国特有の関連データ・情報が不可欠となるため、排出インベントリ開発においては、国際協力の体制も必要となる。

対象物質についても、求められる詳細度・精度が上がっている。地表オゾンや二次有機エアロゾルの光化学生成シミュレーションの精度を上げるため、また、それに基づく効果的な発生源対策を検討するためには、NMVOCs の成分別排出量デ

ータが必要となる。これを排出インベントリで考慮するためには、発生源別の NMVOCs 排出量成分比が不可欠であるが、各国の状況に適した成分比データの整備が課題となっている。また、PM_{2.5} についても、BC、OC に加え、金属成分、イオン成分別の排出量データが求められており、更に、凝縮性ダスト、中間揮発性有機化合物 IVOC (Intermediate Volatility Organic Compounds) などの考慮や、気候変動の観点からは、光吸収性を持つブラウンカーボンを考慮する必要性も議論されている。

発生源については、排出量推計値の精度を上げるため、できる限り詳細に発生源を定義し、排出係数、除去率などのパラメータを技術別に用意し、各国で適用されている技術及びその導入率に関する情報を入手して排出量推計を行うことが望ましい。そのためには、先に述べた、国際協力体制の構築も必要となる。一方で、排出インベントリ開発に使用可能な予算的、人的資源は限られるため、各国の排出量推計において重点を置くべき発生源の解析 (Key Category Analysis) を行い、効果的な資源の配分を行うことも重要である。

また、時代とともに新たな発生源も生まれる。近年では、脱炭素の観点から、アンモニア燃料、水素燃料が注目されている。これらは、燃焼時に CO₂ を排出しないため、それぞれの生成時に発生する CO₂ を抑えることができれば、脱炭素に貢献する。しかしながら、NO_x は排出されるため、大気汚染物質・SLCF 排出インベントリでは、発生源として考慮する必要がある。また、電気自動車については、燃料自動車が排気管から排出するガス・エアロゾルの考慮は不要となるが、車両の重量が増す分、タイヤ・ブレーキの粉塵、路面・巻き上げの粉塵を起源とする PM_{2.5} 排出量は増加すると考えられている。この様な発生源にも対応していくことが重要な課題である。

4.2 排出インベントリの検証

排出量の推計は活動量、排出係数、除去率などのパラメータを組み合わせで行うが、各パラメータには不可避の不確実性が存在する。また、排出インベントリをモデル入力データとして使用するためには、グリッド化、時間分配が必要となるが、この処理の際、更なる不確実性が加わる。従って、排出インベントリの活用にあたっては、不確実性の評価・検証のプロセスが必要である。

まず、排出量推計に使用したデータの精度検証は必須であるが、特に大気中寿命の比較的短い大気汚染物質・SLCFs の排出インベントリに対しては、発生源に近い場所の情報を含む観測データとモデルを用いた検証が有効である。モデル入力データとして使用された排出インベントリに関する、モデル研究者からのフィードバックは、排出インベントリ開発者にとって、データ改良に向けた有益な情報となる。排出インベントリ開発者、モデル研究者間で定常的に意見交換の場を持つことが望ましい。また、主に衛星観測データと数値アルゴリズムを用いて計算された排出量逆推計結果との比較は、排出インベントリのより直接的な検証として有効である。

この様な、観測・モデル(排出量逆推計を含む)を用いた排出インベントリの定期的な検証は、排出インベントリ開発プロセスの一環として組み込まれるべきであり、そのための体制整備が課題である(図 4)。

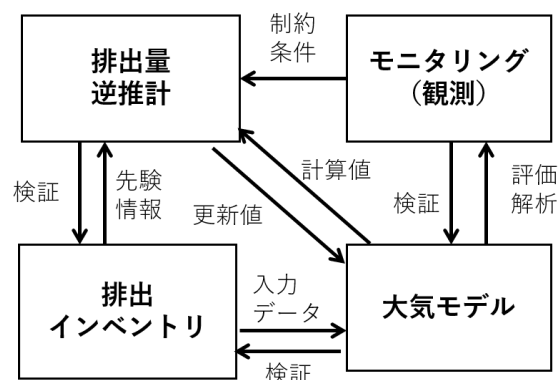


図 4 観測・大気モデル・排出量逆推計と排出インベントリ
の関係。

4.3 SLCF 排出インベントリに対する IPCC の動きへの対応

2024 年 8 月に開催された IPCC 第 61 回総会は、SLCF 排出インベントリに関する方法論報告書(2027 IPCC Methodology Report on Inventories for Short-lived Climate Forcers, 以降 SLCF 方法論報告書)を作成することを決定し、2027 年の出版に向け、本稿発表時点においても執筆活動が続いている。SLCF 方法論報告書は、当初 2006 IPCC 温室効果ガスインベントリガイドライン(以降 GHG ガイドライン)の補足(Supplement)として作成することが提案されたが、最終的には、独立した文書として作成することが総会において決定された。これは、IPCC が SLCFs の重要性を強く認識していることを示している。一方、SLCF 方法論報告書は、NO_x, CO, NMVOCs, SO₂, NH₃, BC, OC 及び放射強制力に関連する一次粒子状物質(第 61 回 IPCC 総会において primary particulate matter relevant for radiative forcing, as appropriate として表現されている物質。現在進められている執筆・査読の過程を通し、対象範囲が定められていく予定)を対象物質としているが、報告書の巻構成(1. 一般的ガイダンス, 2. エネルギー, 3. 工業プロセス及び製品の使用, 4. 農業, 森林及びその土地利用, 5. 廃棄物)は GHG ガイドラインと同一であり、各巻の内容も GHG ガイドラインとの整合性が強く意識されている。これは、国家 SLCF 排出インベントリの作成において、先行して作成されている国家 GHG 排出インベントリとの整合性が求められることを意味している。

対象物質を見れば分かる通り、SLCF 方法論報告書の対象物質は一般的な大気汚染物質排出インベントリの対象物質とほぼ同様である。しかしながら、多くの国において、現状の大気汚染物質排出インベントリをそのまま SLCF 排出インベントリに置き換えればよいとはならないと想定されている。これは、求められる発生源カテゴリーの定義や手法の差異もさることながら、大気汚染物質排出インベントリと GHG 排出インベントリの開発は独立して行われているケースが少な

くなく、共通する発生源の活動量、排出量推計手法などの整合性を確保するための検討・作業が必要となるためである。これは日本においても同様であり、今後に向けた重要な課題となっている。

5. おわりに

本稿では、アジア域を対象とした大気汚染物質・SLCF 排出インベントリの現状と課題点について概要を紹介した。排出インベントリは、その性質上完成した時点から古くなり、新しいデータが求められる。また、大気化学・科学の発展、モデルの高度化、新しいエネルギー、産業、技術の進展に伴う排出量の変化への対応など、その精緻化が求められ続ける。排出インベントリは終わりの無い仕事と言われる。これは、見方を変えれば、やりがいが増え続ける仕事とも言える。本稿が少しでも排出インベントリの開発・改良を担う人材の拡大につながれば幸いである。

謝辞

本稿で紹介した REASv4 における排出量推計は、(独)環境再生保全機構の環境研究総合推進費 S-20-3 (3)JPMEERF21S12012 の助成を受けて実施された。

参考文献

- Akimoto, H., & Narita, H. (1994), Distribution of SO₂, NO_x, and CO₂ emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with 1°×1° resolution, *Atmos. Environ.*, 28(2), 213–225, doi: 10.1016/1352-2310(94)90096-5.
- Chatani, S. et al. (2018), Overview of Model Inter-Comparison in Japan's Study for Reference Air Quality Modeling (J-STREAM), *Atmosphere*, 9, 19, doi: 10.3390/atmos9010019.
- Guizzardi, D. et al. (2025), The HTAP_v3.2 emission mosaic: merging regional and global monthly emissions (2000–2020) to support air quality modelling and policies, *Earth Syst. Sci. Data*, 17, 5915–5950, doi: 10.5194/essd-17-5915-2025.

- Janssens-Maenhout, G. et al. (2015), HTAP_v2.2: a mosaic of regional and global emission grid maps for 2008 and 2010 to study hemispheric transport of air pollution, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11411–11432, doi: 10.5194/acp-15-11411-2015, 2015.
- Kato, N., & Akimoto, H. (1992), Anthropogenic emissions of SO₂ and NO_x in Asia: emissions inventories, *Atmos. Environ.*, 26, 2997–3017, doi: 10.1016/j.atmosenv.2007.10.066.
- Kurokawa, J. et al. (2013), Emissions of air pollutants and greenhouse gases over Asian regions during 2000–2008: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 2, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 11019–11058, doi: 10.5194/acp-13-11019-2013.
- Kurokawa, J., & Ohara, T. (2020), Long-term historical trends in air pollutant emissions in Asia: Regional Emission inventory in ASia (REAS) version 3, *Atmos. Chem. Phys.*, 20, 12761–12793, doi: 10.5194/acp-20-12761-2020.
- Lee, D.-G. et al. (2011), Korean national emissions inventory system and 2007 air pollutant emissions, *Asian J. Atmos. Environ.*, 5, 278–291, doi: 10.5572/ajae.2011.5.4.278.
- Li, M. et al. (2017), Anthropogenic emission inventories in China: a review, *Natl. Sci. Rev.*, 4, 834–866, doi: 10.1093/nsr/nwx150.
- Li, M. et al. (2024), MIXv2: a long-term mosaic emission inventory for Asia (2010–2017), *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 3925–3952, doi: 10.5194/acp-24-3925-2024.
- Ohara, T. et al. (2007), An Asian emission inventory of anthropogenic emission sources for the period 1980–2020, *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4419–4444, doi: 10.5194/acp-7-4419-2007.
- Shibata, Y., & Morikawa, T. (2021), Review of the JCAP/JATOP Air Quality Model Study in Japan, *Atmosphere*, 12, 943, doi: 10.3390/atmos12080943.
- Streets, D. G. et al. (2003a), An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000, *J. Geophys. Res.*, 108, 8809, doi: 10.1029/2002JD003093.
- Streets, D. G. et al. (2003b), Biomass burning in Asia: Annual and seasonal estimates and atmospheric emissions, *Global Biogeochem. Cy.*, 17, 1099, doi: 10.1029/2003GB002040.
- Zhang, Q. et al. (2009), Asian emissions in 2006 for the NASA INTEX-B mission, *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 5131–5153, doi: 10.5194/acp-9-5131-2009.

原稿受領日: 2026 年 6 月 25 日

掲載受理日: 2026 年 7 月 22 日

著者所属

1. アジア大気汚染研究センター

* 責任著者

Junichi Kurokawa <kurokawa@acap.asia>

第31回大気化学討論会のお知らせ

森本真司^{1*}, 村田功¹, 梅澤拓^{1,2}, 菅原敏³, 町田敏暢^{4,2}, 佐伯田鶴², 石戸谷重之⁵, 亀崎和輝⁵, 後藤大輔⁶, 藤田遼⁷

第31回大気化学討論会を2026年10月14日(水)～16日(金)に、宮城県仙台市の東北大学片平キャンパスにおいて開催いたします。現地での口頭発表とポスター発表に加えて、関連分野でご活躍の先生方をお招きした特別講演も予定しています。また15日(木)夕方には、広瀬川すぐそばの「仙臺緑彩館」にて懇親会を企画しております。皆様のご参加をお待ちしております。

主催：日本大気化学会、名古屋大学宇宙地球環境研究所(ISEE)

共催：東北大学大学院理学研究科

会場：東北大学 片平キャンパス 片平さくらホール
(<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/campus/01/katahira/>,
<https://www.tohoku.ac.jp/japanese/profile/campus/01/katahira/areac.html>)

日程：2026年10月14日(水)午後から
10月16日(金)午前中までの予定
(発表件数によって変更の可能性あります)

開催形式：対面開催

懇親会：2026年10月15日(木) 仙臺緑彩館
(事前登録制、会場からのバス送迎あり)

保育支援：討論会期間中に保育支援を実施します
宿泊・交通：各自での手配をお願いします。仙台市中心部のホテルは、イベントの開催時に予約が取りづらくなります。お早めの予約をご検討下さい。

詳細は、以下の大気化学討論会 web サイトでご確認ください。

https://jpsac.org/symposium/31th_touronkai_2026/



開催までのスケジュール:

講演・参加申込み受付開始：7月6日

講演申込みおよび予稿原稿締め切り：8月24日

参加申込み・参加費振り込み締め切り：9月14日

講演プログラム公開：9月中旬

講演及び参加申込みは、第31回大気化学討論会 web サイトで受け付けます。内容をご確認の上、講演申込み、参加登録及び参加費の振込みをお願いいたします。

*1 講演発表は会員のみ可能です。

*2 大気化学討論会・懇親会ともに、当日参加の受付は致しません。期日までに申込みをお願いします。

問い合わせ先:

第31回大気化学討論会実行委員会

<meeting2026-jpsac@jpsac.org>

第31回大気化学討論会実行委員会:

森本真司(代表, 東北大学), 村田功(東北大学), 梅澤拓(東北大学, 国立環境研究所), 菅原敏(宮城

教育大学), 町田敏暢(広島大学, 国立環境研究所),
佐伯田鶴(国立環境研究所), 石戸谷重之(産業技術総合研究所), 亀崎和輝(産業技術総合研究所),
後藤大輔(国立極地研究所), 藤田遼(気象庁気象研究所)

プログラム委員:

石野咲子(金沢大学), 山地一代(神戸大学), 江波
進一(筑波大学), 梅澤拓(東北大学, 国立環境研究所)

著者所属:

1. 東北大学
2. 国立環境研究所
3. 宮城教育大学
4. 広島大学
5. 産業技術総合研究所
6. 国立極地研究所
7. 気象庁気象研究所

*** 責任著者**

Shinji Morimoto <mon@tohoku.ac.jp>

2026 年度日本大気化学会奨励賞

日本大気化学会では日本の大気化学分野の発展を担う若手研究者を奨励するため、奨励賞を授与しています。第22回(2026年度)奨励賞は2026年5月29日より受賞候補者の募集を行い、7月10日に募集を締め切りました。

ただいま選考作業が進められておりますが、8月中旬に受賞者を決定し、10月14日より東北大学片平キャンパスで開催される第31回大気化学討論会において授与式ならびに記念講演を行う予定です。

過去の受賞者および大気化学会奨励賞に関する細則については、日本大気化学会HP:

<https://jpsac.org/activity/prize/jpsac-incentive-award/>

<https://jpsac.org/about/rule/>

をご参照ください。

日本大気化学会
表彰推薦委員長

(日本大気化学会運営委員会)

第4回日本大気化学会論文賞の選考結果について

受賞論文1: Diurnal, seasonal, and interannual variations in $\delta(^{18}\text{O})$ of atmospheric O_2 and its application to evaluate natural and anthropogenic changes in oxygen, carbon, and water cycles, *Atmos. Chem. Phys.*, **25**, 1965–1987, 2025.

著者: Ishidoya, S., Sugawara, S. and Okazaki, A.

受賞理由: 地球大気の O_2 の同位体比 ($\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$) は、陸と海の生物活動を通じて海水の H_2O の $\delta(^{18}\text{O})$ より 24‰ 高く、数万年の間には約 1‰ 変化することが知られている。 $\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$ を観測することができれば大気中の O_2 や CO_2 の変動における生物圏の寄与と化石燃料消費の寄与の定量的な分離が可能になるほか、経年変動を検出できれば地球システムモデルの評価に有用であるとされている。しかしながら、現代の大気中における $\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$ の変動は数時間から数カ月のスケールでわずか 0.001‰ 程度、経年変動はさらに僅かであると予想されており、これまで明確な観測は存在しなかった。

本論文では独自の試料導入手法を採用した同位体比質量分析計を用いて測定値の時間ドリフトを1カ月以上にわたり無視できるレベルにまで低減したことで測定誤差を大幅に低減し、 $\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$ の極微小変動を捉えることに成功した。さらに本論文では、つくば市において10年間にわたり超高精度で測定した $\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$ の観測結果から、その日変化、季節変化、経年変化を初めて明らかにした。 $\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$ の日変動を O_2 濃度 CO_2 濃度とともに解析したところ、 O_2 濃度の日変動の主要因は夏季には生物活動、冬季は化石燃料消費

であることが明らかになり、冬季の化石燃料による CO_2 放出の起源別寄与を推定することにも成功した。また、観測された $\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$ の経年変化は 0.00022 ± 0.00014 ‰/年の増加傾向を示すことが明らかになった。長期変動の要因を探るためボックスモデルを構築し、過去150年間の気候変動で予測される光合成の増加、光呼吸の減少 (CO_2 施肥効果)、さらに水循環同位体3次元モデル MIROC5-iso により推定した葉内水の酸素同位体比の増加を考慮した計算を行った。各種プロセスの同位体効果として Bender et al. (1994) の報告値を使用した場合には、経年変動の主要因が光合成の増加であることが示唆され、 $\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$ の長期観測が炭素・酸素・水の生物地球化学サイクルの理解に極めて有用であることを示した。

以上のように本論文は $\delta\text{atm}(^{18}\text{O})$ の日変化、季節変化、経年変化を世界に先駆けて明らかにし、得られた観測結果に基づいて、生物活動と化石燃料消費の寄与の分離や、グローバルな生物活動の長期変動の評価に関する新たな方法論を提唱した。これらの業績は大気化学分野の研究の発展に大きく寄与するものであり、我が国の大気化学研究のプレゼンス向上にも貢献する。以上の理由により、日本大気化学会は本論文に同賞を授与する。

受賞論文2: Dominant role of Arctic dust with high ice nucleating ability in the Arctic lower troposphere, *Geophysical Research Letters*, 50, e2022GL102470, 2023.

著者 Kawai, K., Matsui, H. and Tobo, Y.

受賞理由: 北極域は全球平均に比べて急速に温暖化が進行しており、将来の気候変化予測の観点から大きな関心が寄せられている。北極域の気候に強い影響を与えている要素の一つが下層雲であり、その分布や寿命の変化は北極域の放射収支を理解する上で鍵となる。大気エアロゾルは太陽光の散乱・吸収を通して放射収支に影響を及ぼすとともに、雲凝結核や氷晶核として雲の性質を変化させる（エアロゾル-雲相互作用）。このうち特に氷晶核は過冷却水滴と氷晶から成る混合相雲の放射特性、寿命、降水過程を制御しているが、その動態には未解明の部分が多く、気候変化予測における主要な不確実要素の一つとなっている。

本論文は、夏から秋にかけて北極域の陸域から放出されるダスト（北極ダスト）が、北極下層雲における氷晶形成を強力に促進することを、全球気候モデルによって初めて定量的に明らかにしたものである。北極ダストは有機物の存在により一般的な砂漠起源のダスト（黄砂など）に比べて氷晶核になりやすいことが著者らの近年の観測で示されていたが、本論文ではこの特性をモデルに導入し氷晶形成過程への寄与を評価した。北極ダストの氷晶核特性を考慮した数値モデル計算により、北極域のさまざまな地点で観測された氷晶核の数濃度を精度良く再現できるようになり、観測とモデルの整合性が飛躍的に向上した。また、北極ダストの氷晶核特性を考慮しない場合と比べて、北極域の下層雲における氷晶核数は100倍以上増加し、北極ダストがその主要な起源になることを明らかにした。これにより、北極ダ

ストが夏季の北極下層雲における氷晶形成を支配する主要因となり得ることを定量的に示した。当該研究成果は、北極域の下層雲において氷晶形成を引き起こすエアロゾルの起源と寄与を明らかにし、不確実性の大きい氷晶形成過程の理解を大きく前進させたものである。北極域に特有のダストを考慮することが、氷晶核の分布や雲の放射特性を正確に評価する上で不可欠であることを示し、エアロゾル-雲相互作用の理解に新しい視点を与えた。また、観測に基づくモデル解析によって北極下層雲の氷晶核数濃度を現実的に捉え、北極域の気候変化の理解と将来予測の精度向上に向けた重要な基盤を築いた。

本論文は、エアロゾルモデル開発で多くの実績を有する松井氏と河合氏、および氷晶核に関して先駆的な研究を行っている當房氏の共著によるもので、日本発の研究として国際的に見ても非常に独自性が高いと評価できる。以上の理由により、日本大気化学会は本論文に同賞を授与する。

※日本大気化学会では次回の論文賞より年度表記を表彰日に合わせることにいたします。次回は、第5回（2027年度）論文賞として募集を行います。

（日本大気化学会運営委員会）

JpGU-AGU 2026 Atmospheric Chemistry セッション開催報告

江波進一^{1*}, 石野咲子², 梅澤拓³, 山地一代⁴

2026 年 5 月 24 日～29 日に JpGU-AGU Joint Meeting 2026 がハイブリッド形式(幕張メッセ会場＋オンライン)で開催されました。Atmospheric Chemistry (大気化学)セッションでは、86 件の発表(口頭 28 件(うち招待講演 1 件), ポスター58 件)があり、5 月 28, 29 日に口頭セッション 5 コマ(1 コマ 90 分)とポスターセッションを1コマ実施しました。今回は、AGU 側から、白岩学氏(UC Irvine)と宮崎和幸氏(NASA/JPL)にコンビーナーとして参加していただきました。

口頭発表セッションの現地会場では 40~50 名、オンライン会場には 20 名以上の参加があり、活発な議論が繰り広げられました。今回は英語での発表でしたが、質疑応答も含めて盛況でした。学会後に発表者を対象に行った言語に関するアンケートでは、英語での発表に対してポジティブな意見が多く、好評だったようです。大気化学セッションでは、大気化学の周辺・境界領域や近年特に注目されている分野の研究者による招待講演を設けています。今回は、横山竜宏教授(京都大学生存圏研究所)に、「Where Atmospheric Chemistry Meets Ionospheric Physics」というタイトルで招待講演を行って頂きました。電離圏と成層圏・対流圏の関連性・相違点をわかりやすく紹介してくださり、非常に興味深い内容でした。5 月 29 日の口頭発表セッション終了後には別会場でポスター発表が行われ、こちらも参加者が多く、非常に活発な議論が繰り広げられました。

今回の大気化学セッションは、86 件の発表ということで、過去最高の人数となりました。当セッションにご参加頂いた皆様、開催にご協力頂いた皆様に深く感

謝申し上げます。来年度の大気化学セッションにも是非ご投稿頂き、一層盛り上げていただけますよう、よろしくお願い申し上げます。

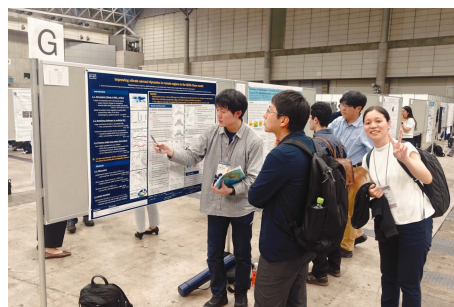


図 1 現地でのポスター会場の様子①

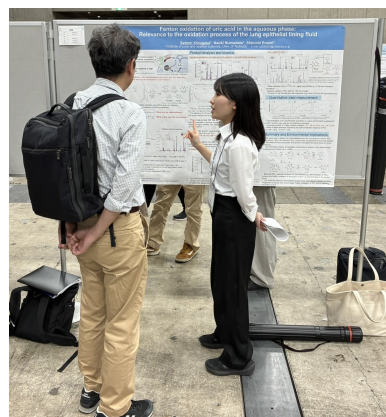


図 2 現地でのポスター会場の様子②

著者所属:

1. 筑波大学 数理物質系
2. 金沢大学 環日本海域環境研究センター
3. 東北大学 大学院理学研究科
4. 神戸大学 海事科学研究科

* 責任著者:

Shinichi Enami

<enami.shinichi.ka@u.tsukuba.ac.jp>

日本大気化学会会員集会プログラム

日時:2026 年 5 月 29 日(金) 12:30-13:00

場所:幕張メッセ 105 会議室

- 1) 持田会長より挨拶
- 2) 会計・会員報告
- 3) 賛助会員のご紹介
- 4) JpGU-AGU 2026 での大気化学セッション
- 5) 第 31 回大気化学討論会
- 6) 男女共同参画・人材育成の活動について
- 7) 学会誌「大気化学研究」について
- 8) 日本大気化学会論文賞について
- 9) その他

日本大気化学会論文賞授与式

(日本大気化学会 運営委員会)

第 43 回日本大気化学会運営委員会議事録

第 43 回日本大気化学会運営委員会

日時:2026 年 5 月 22 日(金) 10:30-12:45

場所:WEB 会議による開催

出席者:池田恒平, 石野咲子, 梅澤拓, 江波進一, 大畑祥, 大島長, 江口菜穂, 河野七瀬, 齋藤尚子, 関谷高志, 竹川暢之, 中山智喜, 町田敏暢, 持田陸宏, 山地一代

欠席者:なし

(敬称略, 50 音順)

持田会長より挨拶があった。

1) 議事録確認

「大気化学研究」誌に掲載済の第 42 回運営委員会の議事録について確認がなされた。

2) 会員数の学会ウェブサイト上での公開について

会長より, 学会ウェブサイト上での会員数の公開の提案がなされた。学生会員・正会員・シニア会員・準賛助会員・賛助会員の区分ごとの人数を公開することに決定した。

3) 会計・会員の状況について

会計・会員担当の大畑委員より, 現時点での会員数と会計の状況と, 水野監事による会計監査の実施について報告がなされた。

4) JpGU-AGU Joint Meeting 2026 の準備状況について

プログラム担当の江波委員より, 大気化学セッションについて報告がなされた。投稿数は計 86 件, 5 コマの口頭セッションとポスターセッションを予定している。プログラム委員に加えて, AGU 側のコンビーナとして白岩氏, 宮崎氏に参画いただいている。JpGU 発表者と会員に対して, 後日, 発表言語についてのアンケートを実施することになった。

5) 2026 年度第 31 回大気化学討論会の準備状況について

討論会 LOC の梅澤委員より, 第 31 回大気化学討論会を 10/14-16 に東北大学片平キャンパスで開催する予定であることが報告された。今後の予定, 討論会ウェブサイト等の準備の段取りについて確認がなされた。

6) 大気化学研究誌について

編集担当の池田委員より, 大気化学研究誌を国立国会図書館のオンライン資料収集制度に基づき納入した旨と, 「大気化学研究」2026 年夏号の編集状況について報告がなされた。学会の参加報告について掲載の要望があった。

7) 日本大気化学会論文賞について

表彰担当の町田委員より, 論文賞の選考経緯について報告がなされた。受賞者は運営委員会にて決定され, その結果は受賞者に伝達済みであることが報告された。論文賞の年度表記を受賞式の年度に合わせることに決定した。育志賞については推薦希望がなかったため, 積極的な応募を呼び掛けることになった。

8) 男女共同参画・人材育成委員会の活動について

男女共同参画・人材育成担当の河野委員より, IGAC 会議の若手支援などの取り組みについて報告がなされた。申請があった場合, 学会として会員のアウトリーチ活動を後援することとなった。学会ウェブサイト上で会員の研究室紹介ページを作成するなど, その他の学会としてのアウトリーチ活動については, 継続して議論・検討することになった。

9) 情報広報委員会の活動について

学会ウェブサイトの大気化学の研究室のページ更新を随時行っている旨の報告がなされた。

10) その他

会計・会員の状況で報告があった繰越金の有効活用について、継続して議論・検討をすることになった。

以上

(日本大気化学会 運営委員会)

編集後記

今号では、トピックとして「排出インベントリ」をテーマに、全球の人為起源 CO₂, 国内の温室効果ガス, アジア域の大気汚染物質および短寿命気候強制因子(SLCFs)を対象とした 3 編の総説記事を掲載しました。ご執筆ならびにレビューをお引き受けいただいた皆様に、改めて感謝申し上げます。排出インベントリは、大気中の温室効果ガスや大気汚染物質の動態を理解し、その将来変化を予測するための基礎情報であると同時に、排出削減策の検討やその効果の評価にも欠かせないものです。そのため今回のテーマは、気候変動や大気汚染に関する科学的研究と、その成果が反映される環境政策との接点に位置するものともいえます。3 編の記事を通じて、排出量がどのような情報に基づいて推計され、その精度や不確実性がどのように評価されているのか、また、それらが研究や政策の中でどのように利用されているのかを知ることで、科学と政策とのつながりについても理解を深めていただけるのではないかと思います。いずれの記事も、それぞれの分野の最新の知見を日本語で分かりやすく整理した内容となっています。排出インベントリを日頃利用されている方だけでなく、これまであまり馴染みのなかった方にも、ぜひ手に取っていただければと思います。(YS)

大気化学研究 第55号 (2026年8月27日 発行)

編集兼発行：日本大気化学会

編集委員：池田恒平(編集長), 河野七瀬, 上田紗也子, 佐伯田鶴, 染谷有

連絡先：〒162-0801 東京都新宿区山吹町358-5 アカデミーセンター 日本大気化学会事務局

電話：03-5389-6237

FAX：03-3368-2822

電子メール：jpsac-post@as.bunken.co.jp

ホームページ：<https://jpsac.org/publications/aacr/>

《本誌掲載著作物の転載を希望される方へ》

本誌に掲載された著作物を転載される場合は、上記までご連絡ください。無断での二次使用や勝手な加工はお控えください。